



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Prallstrahltrockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern

Dosdoğru, Günay
(1983)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013969>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Article

Division: 16 Department of Mechanical Engineering
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13969>

Prallstrahltrockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern

Von Günay Dosdoğru

Überreicht durch

LANGBEIN & ENGELBRACHT GmbH

Bau lufttechnischer Anlagen

Hattinger Straße 951 · Postfach 500175
D-4630 Bochum 5 · Tel. 0234/49856 · Telex 825619



Prallstrahltrockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern

von Günay Dosdoğru¹

1. Einleitung

Zur Trocknung von großflächigen Bahnen wie z. B. Papier-, Bedruckstoff- und Textilbahnen, werden in vielen Fällen Prallstrahltrockner eingesetzt.

Es ist bereits seit nahezu 50 Jahren bekannt, daß die Prallstrahltrockner, bei denen Düsenstrahlen mit hohen Geschwindigkeiten senkrecht oder nahezu senkrecht auf die zu trocknende Bahn aufprallen und dabei einen hohen Wärme- und Stoffübergang bewirken, bei gleichen Massenströmen der Luft ein Trocknungsgut schneller und gleichmäßiger trocknen als die sog. Überströmtrockner. Überströmtrockner sind nach der Definition von Kröll [2] – wie auch Prallstrahltrockner – Konvektionstrockner, die jedoch das Gut einem Luftstrom aussetzen, der an der Gut-Oberfläche entlangstreicht.

Auch bei Schwebetrocknern, die z. B. im Papiermaschinenbereich teilweise in Streichanlagen oder im Druckmaschinenbereich in Rollenoffsetmaschinen zum Einsatz kommen, sind Schwebetrockner oft als Überströmtrockner vorzufinden, bei denen der Luftstrom im wesentlichen an der Gut-Oberfläche entlangstreicht und zugleich eine mehr oder weniger gute schwebende Bahnführung ermöglicht. Da bei solchen Schwebetrocknern in der Regel die dem Prallstrahltrockner charakteristischen Staubbereiche mit hohen Wärme- und Stoffübergangszahlen fehlen, sind sie im Hinblick auf hohe Trocknungsraten den reinen Prallstrahltrocknern unterlegen. Diese Feststellung setzt natürlich voraus, daß bei der Konstruktion eines Prallstrahltrockners eine aerodynamische Optimierung nach dem bekannten Stand der Technik durchgeführt wurde.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde wegen der Verknappung der Energiereserven in immer mehr Produktionsbetrieben die Energieeinsparung neben der Luftreinhaltung zum Hauptthema. Es ist daher selbstverständlich, daß auch der Trockner optimal und wirtschaftlich funktionieren muß. Dies bedeutet, daß der Trockner bzw. das Trocknungsprinzip nicht nur nach Teilaspekten wie z. B. der Bahnführung gewählt werden muß, sondern vorrangig nach seiner Trocknungsintensität bei gleichzeitiger Gewährleistung einer schonenden, gleichmäßigen Trocknung.

Daß ein solcher Trockner insbesondere im Fall der Trocknung von lösemittelhaltigen Farbaufträgen – (sei es Druckfarbe oder Streichmasse) – bei größtmöglicher Dichtigkeit heute mit minimalen Abluftmengen auskommen muß, damit er in Verbindung mit einer thermischen Abluftreinigungsanlage energetisch vertretbar betrieben werden kann, ist ebenso eine Selbstverständlichkeit wie der Einsatz einer Wärmerückgewinnungsanlage.

In den nächsten Ausgaben wird über einen leistungsfähigen und energiesparenden Trockner, über den Einsatz und die Wirkungsweise von Prallstrahltrocknern bei verschiedenen Bahnführungen – einschließlich Prallstrahl-Schwebetrockner – berichtet, wobei auch Vergleiche mit Überströmtrocknern angestellt werden. Um zu einer vergleichenden Leistungsbetrachtung bei der Vielzahl von verschiedenen Schwebetrocknern zu gelangen, wird vorerst nach der Art der Strömungsführung (Anströmungsart der Bahnoberfläche) eine Klassifizierung vorgenommen. Anschließend werden neue Prallstrahl-Schwebetrockner behandelt. Die energetische Betrachtungsweise schließt auch anhand eines Beispiels das Zusammenwirken einer thermischen Abluftreinigungsanlage mit einem neuen Prallstrahl-Schwebetrockner ein.

2. Wärme- und Stoffübergang bei Prallstrahlanordnungen

Die aerodynamischen und thermischen Gesetzmäßigkeiten bei verschiedenen Prallstrahlanordnungen wurden bisher durch mehrere Untersuchungen bekannt. Eine ausführliche Zusammenstellung über solche Untersuchungen mit Optimierungshinweisen bei Schlitzdüsenausführungen ist z. B. in [4] und über Runddüsenausführungen in [9] zu finden.

Bei Prallstrahltrocknern werden in den meisten Fällen Schlitzdüsenausführungen gegenüber Runddüsen bevorzugt, obwohl energetisch betrachtet bei optimal gewählten Maßverhältnissen und bei gleichem

Energieaufwand zum Erzeugen der Luftströmung ein Rundstrahl nach [7] gegenüber einem Flachstrahl um 30 bis 40 % höhere Wärme- und Stoffübergangszahlen bringen soll. Dieses Ergebnis gilt nur beim Vergleich von einem einzelnen Rund- bzw. Flachstrahl.

In Praxisausführungen lassen sich mit Rundstrahlen bei Düsenfeldern solche Unterschiede kaum nachweisen, weil bei Runddüsenanordnungen mit mehreren runden Prallstrahlen aus konstruktiven und strömungstechnischen Gründen, optimale Maßverhältnisse meistens nicht zu verwirklichen sind. Prallstrahltrockner mit runden Düsen wirken oft ungleichmäßig, z. B. wenn die Luft zwar aus gleichmäßig verteilten Öffnungen auf die zu trocknende Oberfläche prallt aber zwischen mehreren Strahlen hindurch nach den Seiten abströmen muß. Die abströmende Luft lenkt manche Strahlen bereits vor Erreichen der Gut-Oberfläche ab, so daß eine ungleichmäßige Trocknung, insbesondere eine Untertrocknung der Ränder, eintritt. Eine gewisse Verbesserung in dieser Hinsicht wird erreicht, wenn die Rundstrahlen aus gegeneinander versetzten Düsenreihen austreten, wobei zwischen den benachbarten Strahlreihen jeweils durch Freiräume ein besseres Abströmen der Luft quer zur Bahn ermöglicht wird. Aber auch dann ist eine ungleichmäßige Trocknung aus Praxisfällen bekannt.

Gravierender ist jedoch, daß beim Einsatz von Runddüsen-Prallstrahltrocknern häufiger – insbesondere bei empfindlichen Trocknungsgütern oder Farbaufträgen – Markierungen zu beobachten sind, die zweifellos eine Qualitätsminderung des Trocknungsgutes bedeuten.

Eine weitaus gleichmäßigere Trocknung ohne irgendwelche Markierungsgefahren wird beim Einsatz von Prallstrahltrocknern mit Schlitzdüsen gegenüber den Runddüsenanordnungen erzielt.

Bei Schlitzdüsenanordnungen ist es konstruktiv und strömungstechnisch einfacher, selbst bei Bahnbreiten bis 8 m, für einwandfreie Luft-Zu- und -Abströmverhältnisse und damit in Querrichtung der Bahn für gleichmäßige Trocknungs- bzw. Feuchteprofile innerhalb enger Toleranzen zu sorgen.

Nach diesen Ausführungen über die Vorteile der Prallstrahlen mit Schlitzdüsen soll nunmehr kurz auf die zu beachtenden aerodynamischen Gesichtspunkte, die zu höchstmöglichen Wärme- und Stoffübergangszahlen führen [4], eingegangen werden.

In Abb. 1 sind die geometrischen Abmessungen bei Schlitzdüsenanordnungen und Strömungsverhältnisse bei mehrfachen Prallstrahlen schematisch dargestellt. Weitere Einzelheiten sind der Bildunterschrift zu entnehmen.

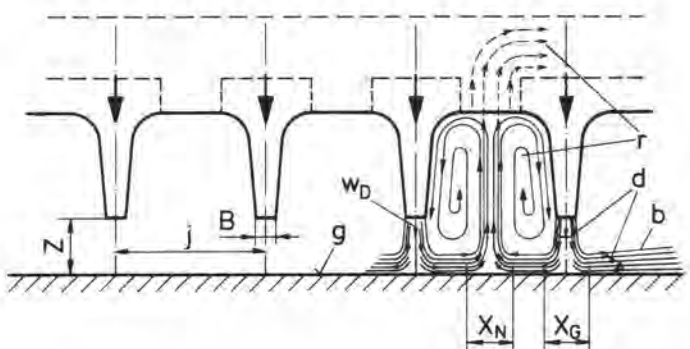


Abb. 1: Prallstrahl-Schlitzdüsentrockner (schematisch)

- B = Düsenbreite
- Z = Bahnabstand
- j = Abstand zwischen den Düsen
- w_D = Düsenaustrittsgeschwindigkeit
- g = Gut-Oberfläche
- b = Strahlgrenze
- d = Strömungsprofile
- X_G = direkter Staubereich unter dem Prallstrahl
- X_N = negativer Staubereich zwischen zwei Prallstrahlen
- r = Rückströmräume

Aus verschiedenen Untersuchungen ist bekannt, daß die höchsten Wärme- und Stoffübergangszahlen bei konstanter Ventilatorleistung pro Flächeneinheit der Trocknungsfläche bei gewissen optimalen Abständen j zwischen den einzelnen Schlitzdüsen und Entfernungen Z des Düsenaustrittes von der Gut-Oberfläche erzielt werden.

¹Dr.-Ing. Günay Dosdoğru, Technischer Leiter der Firma Langbein & Engelbracht GmbH, 4630 Bochum 5

Die Trocknungsleistung wird bekanntlich bei einem gegebenen Temperaturunterschied durch die mittlere Wärme- bzw. Stoffübergangszahl (α_m bzw. β_m) bestimmt. Bei sonst gleichen Bedingungen ist die mittlere Wärmeübergangszahl einer von turbulenten, zweidimensionalen (ebenen) Prallstrahlen beaufschlagten Trocknungsfläche in einem auf die Schlitzdüsenbreite B bezogenen dimensionslosen Abstand von $Z/B = 0,5$ bis 8 etwa konstant. Eine Verschlechterung der mittleren Wärmeübergangszahl tritt erst bei größeren Z/B -Abständen ein. Innerhalb dieses Abstandsreiches führt ferner eine Verkleinerung der Schlitzdüsenbreite B (bei $j/B = \text{konstant}$) zur Erhöhung der mittleren Wärmeübergangszahl.

Die höchsten mittleren Wärmeübergangszahlen werden also bei Prallstrahlrocknern mit Schlitzdüsen in Abständen von $Z/B = 0,5$ bis 8 , mit Düsenbreiten von wenigen Millimetern erzielt. Dabei spielt auch der Abstand j zwischen den Düsen bzw. das sogenannte Düsenteilungsverhältnis j/B eine wichtige Rolle. Bei stark turbulenten Düsenstrahlen, so wie sie in den meisten Praxisausführungen vorliegen, werden die höchsten Wärmeübergangszahlen mit Düsenteilungsverhältnissen $j/B = 15$ bis höchstens 40 erreicht.

Aus Produktionsgründen (z. B. Verstopfungsgefahr der Düsen) wird man als untere Grenze für die kleinste Düsenbreite ca. $B = 2$ mm ansetzen. Normalerweise sind Düsenbreiten von ca. $B = 3$ bis 5 mm üblich.

Auch die optimalen j/B -Verhältnisse wird man nicht immer – insbesondere bei extrem kleinen Düsenbreiten – verwirklichen können und unter Verzicht auf max. Wärmeübergangszahl etwa in der Größenordnung von $j/B = 40$ bis 80 bleiben, damit z. B. im Hinblick auf gleichmäßige Trocknung störungsfreie Abströmverhältnisse zwischen den Düsen gewährleistet sind. Durch geeignete Düsenformen und einwandfreie Zu- und Abluftverhältnisse sind Düsenstrahlen mit weniger Turbulenz und großer Kernlänge erzielbar, bei denen die optimalen mittleren Wärmeübergangszahlen zwar etwas niedriger, dafür aber bei größeren j/B -Werten liegen [4].

Prallstrahlrockner, die im Rahmen der hier kurz aufgezeigten geometrischen und strömungstechnischen Grenzen ausgelegt sind, können als aerodynamisch optimierte Trockner hohe Trocknungsgeschwindigkeiten bei geringstem Energieaufwand erzielen.

Ausreichende Trocknungsgeschwindigkeiten können natürlich auch mit nicht optimierten Trocknersystemen bei entsprechend hohem Energieaufwand durch Erhöhung der Trocknungstemperaturen und/oder der Luftgeschwindigkeiten erreicht werden. Insofern sind Angaben über Trocknungsleistungen ohne eine Energiebilanz nicht aussagefähig.

3. Schwebetrockner und ihre Einteilung nach der Art der Strömungsführung

Eine Stoffbahn, die während des Trocknungsprozesses im Trockner bei hohen Geschwindigkeiten schwebend – also ohne Berührung mit Leitwalzen oder anderen Stützorganen – geführt werden muß, bringt verfahrenstechnische, mechanische und regelungstechnische Probleme mit sich, wenn auch hier bestmögliche und wirtschaftliche Trocknung bei geringster Störung der Produktion verlangt wird. Auf dem Gebiet der Schwebetrockner sind nur wenige Untersuchungen z. B. [10], insbesondere wissenschaftlicher Art zu finden, die etwa Gleichungen über Wärme- und Stoffübergangszahlen bei verschiedenen Luftführungen oder Strömungs- und Druckverhältnisse auf schwebend geführten Bahnen, Stabilitätskriterien usw. beinhalten. Schwierigkeiten bestehen zweifellos darin, daß es bei Schwebetrocknern verschiedenste Strömungsführungen gibt und Untersuchungen bei schwebend geführten, beweglichen Bahnen, etwa durch Erfassung der örtlichen Werte (Druck, Geschwindigkeit, Wärmeübergang usw.) experimentell kaum möglich sind.

Die wenigen aus der Praxis bekannten Untersuchungen oder Angaben der Trocknerhersteller über die Trocknungsgeschwindigkeit bei gewissen Produkten sind meistens fallspezifisch und daher – da auch die Randbedingungen nicht näher bekannt sind – nicht aussagefähig. Eine zufriedenstellende Vergleichsbewertung unter verschiedenen Trocknersystemen wäre nur dann möglich, wenn auch hier wie bei Prallstrahlrocknern systematische Laboruntersuchungen bei verschiedenen Anordnungen angestellt worden wären, mit dem Ziel, Wärme- bzw. Stoffübergangsgleichungen aufzustellen, in denen die wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Größen mit ihren Grenzwerten eingebracht sind.

Versucht man eine gewisse Klassifizierung der bisher aus Industrieausführungen oder Patentschriften bekanntgewordenen Schwebetrockner vorzunehmen, so könnte man grob nach der Art der Anströmung der Bahnoberfläche zwischen

- Prallstrahl-Schwebetrocknern und
- Überström-Schwebetrocknern unterscheiden.

a) Bekannte Prallstrahl-Schwebetrockner

Als gemeinsames Merkmal für Prallstrahl-Schwebetrockner wird definiert, daß Düsenstrahlen (Prallstrahlen) ganz oder teilweise auf einer schwebend geführten Stoffbahn Staubereiche bilden, unabhängig davon, ob sie senkrecht oder schräg auf die Bahn aufprallen. In den meisten Fällen dieser Kategorie werden Düsenkörper eingesetzt, die seitliche Düsenöffnungen (durchgehende oder unterbrochene Schlitz-, bzw. runde Löcher) aufweisen, die zur Erzeugung von Prallstrahlen dienen. Als Beispiel hierzu soll die Skizze in Abb. 2 nach Kröll [2] – vgl. auch [10] – die charakteristischen Merkmale aufzeigen.

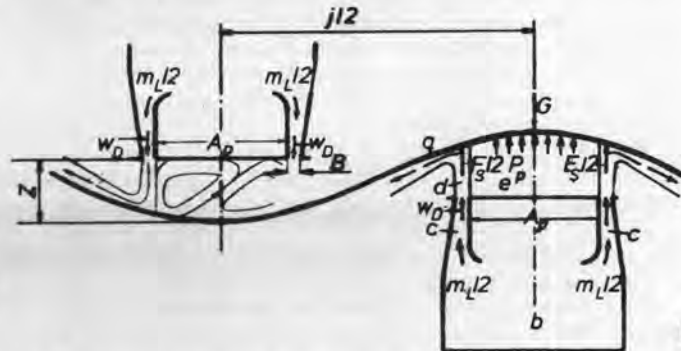


Abb. 2: Prallstrahl-Schwebetrockner üblicher Bauart nach [2] – a Gutsbahn; b Blaskästen; c Düse; d Prallstrahl; e Luftpolster

Dabei können die Düsenstrahlen, wie in Abb. 2 gezeigt, zueinander parallel ausströmen; sie können aber auch zueinander konvergieren oder divergieren.

In der Regel werden solche Blaskästen (oder Düsenkörper genannt) versetzt auf beiden Seiten der Bahn angeordnet. Die Bahn durchläuft dabei in Form von Wellenbewegungen den Trockner. Die schwebende Bahnführung wird z. B. bei der konvergierenden und parallelen Prallstrahlführung im wesentlichen durch die Bildung von sog. Tragwirbelpaaren zwischen den Prallstrahlen, der Bahn und der zwischen den Düsenöffnungen angeordneten Wand A_p erzielt. Diese Wand A_p kann auch perforiert sein und den Abschluß eines separaten Rückströmraumes bilden.

Bei einer bestimmten Ausführungsart mit divergierenden Prallstrahlen erzielt man z. B. die schwebende Bahnführung im wesentlichen aufgrund der sich vor der Bahnsollage schneidenden Schrägstrahlachsen der benachbarten Blaskästen, in Verbindung mit verschiebbaren Verdrängerkörpern, in Rückströmkanälen zwischen den Blaskörpern. Hierbei wird die Bahn vom Düsenaustritt in einer Entfernung von ca. $Z = 50 - 60$ mm schwebend geführt. Bei dieser Gattung von Prallstrahl-Schwebetrocknern mit Doppeldüsenkörper herrschen für die aus den Düsen austretenden Düsenstrahlen meistens keine eindeutigen Abströmverhältnisse.

Abgesehen davon, daß die Bahn bei einigen Ausführungen starken Wellenbewegungen unterworfen ist, ist ihre Entfernung Z vom Düsenaustritt meistens sehr groß. Auch das Düsenteilungsverhältnis j/B , zwischen den auf derselben Seite der Bahn benachbarten Blaskästen, ist verhältnismäßig groß. Es ist daher naheliegend, daß bei verschiedenen der durch diese Gruppe repräsentierten Prallstrahl-Schwebetrocknern, die im Abschnitt 2 kurz dargelegten optimalen aerodynamischen Verhältnisse für möglichst großen Wärme- bzw. Stoffübergang nicht eingehalten werden können.

Inwieweit die schwebende Bahnführung bei diesen Trocknerausführungen auch bei kritischen Produkten und in extremen Fällen (z. B. hohe Bahngeschwindigkeiten, leichte Bahngewichte, große Arbeitsbreiten usw.) zufriedenstellend funktioniert, muß vorab genau geklärt werden [10]. Es ist bekannt, daß sogar bei senkrechten Prallstrahlen bei gewissen Düsenanordnungen neben Überdruckbereiche auch Unterdruckbereiche vorkommen und durchaus stabile Gleichgewichtszustände herrschen. Auf der anderen Seite ist es aber nicht von der Hand zu weisen, daß zwei eng benachbarte Düsenstrahlen sich beim Abströmen mehr oder weniger gegenseitig beeinflussen müssen, wodurch ein Flattern, seitliches Verlaufen oder andere Störungen der Bahn stattfinden können. Auch die Gefahr einer ungleichmäßigen Trocknung in Querrichtung wächst, da das Abführen des Luftpolsters e in Abb. 2 nicht störungsfrei abläuft.

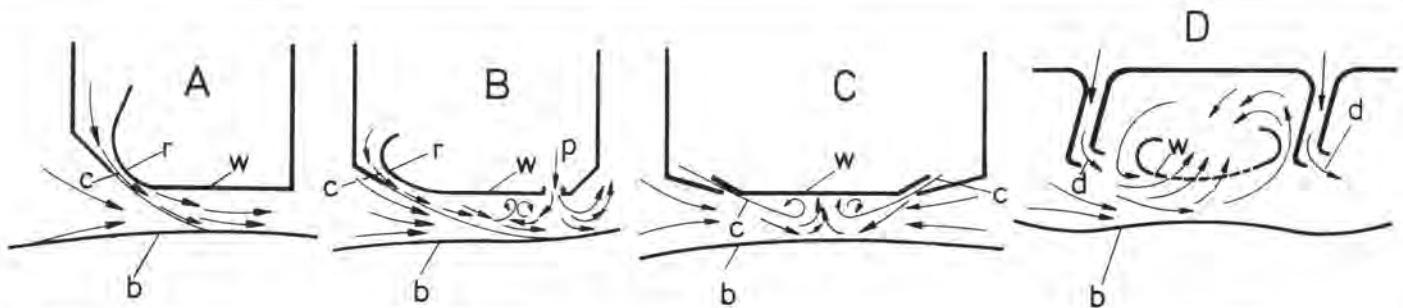


Abb. 3: verschiedene Überström-Schwebetrocknerdüsen (schematisch): Blasdüsenty A: einfacher gekrümmter Strahl c (Coanda-Strahl); Blasdüsenty B: einfacher gekrümmter Strahl c (Coanda-Strahl) mit Hilfsprallstrahl p; Blasdüsenty C: zwei entgegengesetzte gekrümmte Strahlen c (entgegengesetzte Coanda-Strahlen); Blasdüsenty D: flacher Düsenstrahl d geführt über eine tragflächenähnliche perforierte Leitwand w; b = Bahn, w = Düsenwand.

b) Überström-Schwebetrockner

Bei dieser Gruppe der Trockner soll als charakteristisches Hauptmerkmal eine im wesentlichen parallele Anströmung der Trocknungsoberfläche ohne bzw. ohne direkte Staubereiche der Primärstrahlen auf der Trocknungsoberfläche definiert werden. Nach dieser Definition ist es unwesentlich, durch welche Düsenformen eine im wesentlichen parallele Anströmung (ohne direkte Staubereiche) der Trocknungsoberfläche erfolgt.

Mit anderen Worten, eine vom Prallstrahl her bekannte typische Staubeereichbildung mit zwei entgegengesetzten Wandstrahlen (hierzu gehören auch schräge Prallstrahlen) direkt auf der Trocknungsoberfläche fehlt nach der hier vorgeschlagenen Definition bei Überström-Schwebetrocknern. Es bedarf hier einer näheren Erklärung, was nach der Definition unter dem „Primärstrahl“ und sozusagen unter dem „indirekten Staubeereich“ gemeint ist. Hierzu sollen in Abb. 3 anhand von vier typischen Beispielen Vertreter der Gruppe der Überström-Schwebetrockner gezeigt werden.

Wie aus Abb. 3 zu entnehmen ist, bewirken die Düsenstrahlen c und d der Blasdüsenty A bis D unmittelbar nach ihren Austritten aus Düsenöffnungen eine im wesentlichen parallele Anströmung der Bahnoberfläche b. Diese werden als Primärstrahlen definiert. Bei dem Düsentyp B ist z. B. außer dem Primärstrahl c ein Hilfsstrahl p als eine Art Prallstrahl angeordnet. Dieser Hilfsstrahl p kann in der Regel bei einem kräftigen Primärstrahl c, der die Bahnoberfläche überströmt, keinen direkten Staubeereich auf der Bahnoberfläche bilden. Durch Zusammenreffen von zwei entgegengesetzten Strahlen – z. B. beim Düsentyp B Strahl c und ein Teilstrahl von p oder beim Düsentyp C die beiden gekrümmten Primärstrahlen c – entsteht auch ein „indirekter Staubeereich“; ein negativer Staubeereich, ähnlich einem zwischen zwei benachbarten Prallstrahlen nach Abb. 1 entstehenden, negativen Staubeereich.

Die Charakterisierung nach der Art der Anströmung der Trocknungsfläche hat den Vorteil, daß die Strömungs- und Wärmeübergangsverhältnisse praktisch unabhängig von der Düsenform bewertet werden können.

Die durch die Blasdüsenty A, B und C gegebenen gekrümmten Primärstrahlen entstehen durch den sog. Coanda-Effekt. Darunter wird die Umlenkung eines flach austretenden Düsenstrahles um eine mehr oder weniger runde Düsenkante r verstanden, wobei unter gewissen Voraussetzungen eine Umlenkung des Strahles bei flachen Strahlwinkeln auch um eine scharfe Kante möglich ist.

Daß eine Umlenkung eines aus einer Düse austretenden Düsenstrahles über eine mehr oder weniger ausgeprägte Krümmung r möglich ist, wurde bereits 1870 von Reynolds durch Untersuchungen an schwebend gehaltenen Bällen in runden Wasserstrahlen gezeigt.

Tiefere Erkenntnisse über die Umlenkung z. B. der zweidimensionalen Strahlen wurden mindestens seit 1944 durch Untersuchungen von H. Coanda und durch spätere Untersuchungen in den darauffolgenden 20 Jahren bekannt.

Der Coanda-Effekt führt bei verschiedenen Düsentypen zur Umlenkung eines Düsenstrahles, welcher nach der Umlenkung durch teilweises Ansaugen der Bahn unter gewöhnlichen Verhältnissen zum guten Tragverhalten und schwebenden Führen der Bahn dient. Durch solche oder andere Hilfsmaßnahmen wird eine gewisse Verbesserung der schwebenden Führung der Bahn erzielt.

Bessere Rückströmverhältnisse des Düsenstrahles und damit auch stabilere Schwebeverhältnisse sind bei den hier gezeigten Typen offensichtlich bei den Düsentypen A und D gegeben, weil hierbei ein störender Einfluß eines zweiten Strahles am selben Düsenkörper auf die Rückströmung fehlt.

Bei dem Düsentyp D wird die parallele Anströmung der Bahnoberfläche durch einen ziemlich flach austretenden breiten Düsenstrahl, welcher über eine tragflächenähnliche perforierte Leitwand w geführt wird, erzielt.

Die hier gezeigten Düsentypen werden, wie die Prallstrahl-Schwebetrockner (Abb. 2), in den meisten Fällen auf beiden Seiten der Bahn in versetzter Anordnung eingesetzt. Die Bahn durchläuft, je nach Düsentyp, eine mehr oder weniger wellige Linie, die sich am stärksten bei den Düsentypen C und D bemerkbar macht.

Im Betriebszustand betragen die Bahnabstände Z bei der Blasdüsenausführung A normalerweise mindestens ca. 7 bis 10 mm, während sich bei den anderen Typen, insbesondere bei dem Blasdüsenty D, teilweise weit größere Bahnabstände einstellen dürften.

Die Düsenöffnungen bei den Blasdüsenty A, B und C sind im engsten Querschnitt in der Regel in der Größenordnung von einigen Millimetern. Bei dem Düsentyp D sind dagegen vergleichsweise größere Düsenbreiten charakteristisch. Auch in dieser Gruppe sind hinsichtlich der Düsenausführungen verschiedene Varianten anzutreffen, so z. B. anstatt einer durchgehenden Schlitzdüse, Anbringung von mehreren kleinen Lochdüsen in einer Reihe hintereinander bzw. Schlitze in Form von Langlöchern.

An der primärstrahlseitigen Düsenwand w können ferner Perforierungen (oder aber Stolperkanten) angebracht sein, die zum Blasen oder zum Ansaugen sowie nur zum Druckausgleich der Luft vorgesehen sind. Die Strömungsverhältnisse und damit auch der Wärme- und Stoffübergang werden dadurch je nach Ausführungsform mehr oder weniger beeinflusst.

Die Charakterisierung der Anströmung der Bahnoberfläche als eine im wesentlichen ohne bzw. ohne direkte Staubereiche parallele Anströmung ist somit eine Spalt- bzw. Kanalströmung. Der Wärmübergang bei Überström-Schwebetrocknern kann ohne Rücksicht auf die Einzelheiten überschlägig aus den allgemeinen bekannten Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffüberganges für durchströmte Kanäle und umströmte Körper beliebiger Gestalt und Anordnung nach [1], [3], [4] bzw. VDI-Wärmeatlas berechnet werden.

Sicherlich ist auf diese Weise eine in bestimmten Fällen und Ausführungen unzulässige Verallgemeinerung gegeben. Dennoch dürften die zu erwartenden Betriebsverhältnisse und die dazugehörigen Leistungsvergleiche z. B. anhand von Wärme- und Stoffübergangszahlen sowohl in der Tendenz als auch in absoluten Werten nicht allzusehr von wirklichen Verhältnissen abweichen.

In der Fortsetzung werden auf der Grundlage der bisherigen Klassifizierung vergleichende Betrachtungen über den Wärme- und Stoffübergang bei verschiedenen Schwebetrocknergruppen angestellt.

Prallstrahlrockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern

Von Dr. Günay Dosdoğru¹

Folge III

4. Vergleichende Betrachtungen über den Wärme- und Stoffübergang bei verschiedenen Schwebetrocknergruppen

4.1. Theoretische Grundlagen in vereinfachter Form

DIE BERECHNUNG DER TROCKNUNGSGESCHWINDIGKEIT g_{DI} im ersten Trocknungsabschnitt kann bei geringen Partialdruckdifferenzen allgemein in vereinfachter Form nach Gl. (1) erfolgen:

$$g_{DI} = \frac{\beta}{R_D T} (p_{D0} - p_{DL}) \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad (1)$$

In diesem Abschnitt werden bewußt einfache Gleichungen angegeben, um die wichtigsten Zusammenhänge anschaulicher aufzuzeigen. Genauere Gleichungen unter Berücksichtigung von verschiedenen Parametern und Randbedingungen sind z. B. in [1] zu finden. In Gl. (1) bedeuten β Stoffübergangszahl; p_{D0} Partialdruck des Dampfes auf der Oberfläche; p_{DL} Partialdruck des Dampfes in der Luft; R_D die Gaskonstante und T [°K] mittlere Temperatur zwischen der Lufttemperatur t_L und der Oberflächen-temperatur t_w .

Die Oberflächentemperatur t_w und damit auch der Partialdruck p_{D0} (Satttdampfdruck) können bei einer bekannten Lufttemperatur t_L (und p_{DL}) über das Verhältnis (α/β) der Wärme α zu Stoffübergangszahlen β ermittelt werden. Bei der Verdunstung von Wasser bzw. Benzol in trockener Luft ist dieser Zusammenhang in [1], ferner von Toluol und Benzol z. B. in [6] angegeben. Bei sehr kleinen Partialdruckdifferenzen, d. h. für den Fall, wenn Analogie zwischen dem Wärme- und Stoffübergang besteht, gilt nach Nusselt die Beziehung

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\lambda}{k} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = \frac{\lambda}{k} \left(\frac{k}{a} \right)^n \quad (2)$$

In Gl. (2) bedeuten Pr = Prandtl-Zahl; Sc = Schmidt-Zahl; k = Diffusionszahl; λ = Wärmeleitfähigkeit und a = Temperaturleitfähigkeit. Die Stoffwerte sind für die mittlere Temperatur T [K] einzusetzen. Für den Exponenten n gilt angenähert $n = 1/4$. Damit kann nach Gl. (2) bei geringen Temperaturen und Partialdrücken des diffundierten Stoffes in der Luft das Verhältnis (α/β) überschlägig gerechnet werden. Für die Wasserverdunstung in der Luft erhält man mit $To = 273.15 \text{ K}$

$$(\alpha/\beta)_{WL} = 0.2756 (T/To)^{-0.98} \quad [\text{kcal/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}] \quad (2a)$$

und z. B. für die Toluolverdunstung in der Luft

$$(\alpha/\beta)_{TL} = 0.5653 (T/To)^{-1.113} \quad [\text{kcal/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}] \quad (2b)$$

Bei bekanntem Verhältnis (α/β) ist dann zur Ermittlung der Stoffübergangszahl β — und damit nach Gl. (1) zur Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit g_{DI} — nur noch die Kenntnis der Wärmeübergangszahl α erforderlich, falls die Stoffübergangszahl nicht direkt bekannt ist.

¹ Langbein & Engelbracht GmbH, Bochum

a) Wärmeübergang bei Prallstrahlrocknern
Wie bereits im Abschnitt 2 — vgl. [13] — ausgeführt wurde, existieren aus mehreren Untersuchungen bei Prallstrahlrocknern mehr oder weniger unterschiedliche Bestimmungsgleichungen für die mittlere Wärmeübergangszahl α_m bzw. für die Nusselt-Zahl Nu_m , deren Gültigkeits- und Streubereiche z. B. in [5] angegeben sind.

Aus diesen Gleichungen soll als eine repräsentative Gleichung folgende Beziehung nach Gardon und Akfirat [8] für

$$Nu_m = 0.36 (j/B)^{-0.38} (7B/Z)^{0.31} Re_B^{0.62} \quad (3)$$

angegeben werden, wobei $Nu_m = \alpha_m \cdot B/\lambda$ und $Re_B = w_D \cdot B/\gamma$ ist. In Gl. (3) bedeuten noch — vgl. auch Abb. 2 — B = Düsenbreite; j = Düsenteilung (Abstand zwischen zwei Düsen) und Z = Bahn-Düsenabstand.

Die Gleichung (3) ist aus Versuchen mit sehr genau gemessenen örtlichen Wärmeübergangszahlen in Bereichen $7 < Z/B < 64$; $Re_B > 2000$ sowie $16 < j/B < 64$ und $1.59 < B < 6.35$ mit $\pm 15\%$ Genauigkeit aufgestellt worden. Der Vergleich in [5] mit anderen Autoren zeigt, daß Gl. (3) auch in den Bereichen $1 < Z/B \leq 7$ und $j/B \leq 100$ ohne die Z/B -Abhängigkeit, d. h. in der Form

$$Nu_m = 0.36 (j/B)^{-0.38} Re_B^{0.62} \quad (3a)$$

den mittleren Wärmeübergang bei turbulenten Prallstrahlanordnungen gut beschreibt, so daß die Gleichungen (3) bzw. (3a) als charakteristische, einfache Bestimmungsgleichungen in verhältnismäßig weiten Bereichen zur Berechnung der mittleren Wärmeübergangszahl herangezogen werden können.

Es sei erneut darauf hingewiesen, daß die mittlere Wärmeübergangszahl in einem Bereich von etwa $Z/B = 0.5$ bis 8 trotz starker Schwankungen im Verlauf der örtlichen Wärmeübergangszahl entlang der Oberfläche innerhalb einer Genauigkeit von ca. $\pm 15\%$ als konstant angesetzt werden kann [5], auch wenn eine geringfügige Z/B -Abhängigkeit, insb. bei größeren j/B -Abständen vorhanden ist. Damit ist zugleich ein großer Sicherheitsabstand Z zwischen dem Düsenaustritt und der Trocknungsoberfläche (z. B. für $B = 2 \text{ mm}$ ergibt sich $Z = 14\text{--}16 \text{ mm}$) einstellbar, ohne eine Verschlechterung des Wärmeüberganges in Kauf nehmen zu müssen², wie dies beispielsweise bei den meisten Überströmrocknern der Fall ist.

Ferner ist zu beachten, daß als charakteristische Geschwindigkeit für die Wärmeübergangszahl in Gl. (3) direkt die Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D einzusetzen ist, so daß bei gegebener Düsenbreite und -länge sowie Anzahl der Düsen der erforderliche Volumenstrom leicht errechnet werden kann. Im Gegensatz dazu sind bei

² Nach einigen Untersuchungen z. B. Korgor M.; u. Križek, F.: Int. J. Heat Mass Transfer 9 (1966), S. 337—334, ferner z. B. AS 1291290, Anm.: Korgor M. (1969) und nach noch älteren Untersuchungen wurde sogar für $Z/B = 7$ bis 9.5 ein Maximum für den Wärmeübergang festgestellt

den nachfolgend zu behandelnden Anordnungen von Überströmrocknern die Bestimmungsgleichungen für den Wärmeübergang in einer Spaltströmung und im sogenannten Wandstrahl so aufgebaut, daß als charakteristische Geschwindigkeit eine mittlere Spaltgeschwindigkeit w_{sm} eingesetzt wird, welche praktisch nur ca. 50 bis 80% der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D beträgt. Die Stoffwerte in Gl. (3) bzw. (3a) sind bei mittlerer Temperatur T einzusetzen.

Eine gewisse Schrägstellung der Prallstrahlen, die zuweilen zweckmäßigerweise vorgesehen wird, verschlechtert den Wärmeübergang gegenüber der senkrechten Anordnung (90°) kaum, solange ein Winkel von ca. 30° auf der Oberfläche nicht überschritten wird [14]. Das bedeutet, daß in einem bestimmten Winkelbereich auch bei schrägen Prallstrahlen die Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffübergangs von senkrechten Prallstrahlanordnungen Gültigkeit besitzen. In diesem Fall bilden sich auf der Oberfläche nach Überschreitung des Staubereiches — wie es auch bei senkrechter Prallstrahlanordnung der Fall ist — zwei entgegengesetzte, aber im Gegensatz zur senkrechten Anordnung unsymmetrische Wandstrahlen: ein starker „vorwärts“ gerichteter und ein schwacher „rückwärts“ gerichteter Wandstrahl. Dementsprechend ergeben sich, vom Staupunkt aus gesehen, unsymmetrische Bedingungen des Wärme- und Stoffübergangs, welche sich allerdings auf die mittleren α_m - und β_m -Werte nur schwach auswirken.

b) Wärmeübergang bei Überströmrocknern

Im Abschnitt 3 — vgl. [13] —, im Zusammenhang mit der Einteilung der Schwebetrockner nach der Art der Strömungsführung, wurde für Überström-Schwebetrockner als kennzeichnendes Hauptmerkmal eine im wesentlichen parallele Anströmung der Trocknungsfläche ohne bzw. ohne direkte Staubereiche der Primärstrahlen definiert. Es wurde ferner darauf hingewiesen, daß aufgrund einer solchen Charakterisierung für diese Strömungsart — nämlich die im wesentlichen parallele Anströmung — der Wärme- und Stoffübergang wie für eine Spalt- bzw. Kanalströmung ohne Rücksicht auf weitere Einzelheiten überschlägig aus den allgemein bekannten Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffübergangs für durchströmte Kanäle und umströmte Körper beliebiger Gestalt und Anordnung berechnet werden kann. Damit dürften die Wärmeübergangsverhältnisse direkt unter den einzelnen Düsenkörpern nach Abb. 3 — in [13] — (vgl. Abschnitt 3) bzw. Abb. 4 ausreichend genau erfaßt werden. Als Bestimmungsgleichung für die turbulente Rohr- bzw. Spaltströmung wird bekanntlich nach [1], [3], [4], bzw. nach VDI-Wärmeatlas die nach Hausen [15] aus vielen Versuchswerten entstandene folgende empirische Gleichung

$$Nu_d = 0.037$$

$$\left(1 + \frac{d}{L}\right)^{2/3} (Re_d^{0.75} - 180) Pr^{0.42} \quad (4)$$

eingesetzt. Gl. (4) ist in Bereichen $2300 < Re_d < 10^6$, mit $Re_d = w_{sm} \cdot d/\nu$ und $0.6 < Pr < 500$; $1 < L/d < \infty$ oder $1 > d/L > 0$ gültig. Für unrunde Querschnitte ist anstelle des Rohrdurchmessers d der hydraulische Durchmesser

$$d_h = 4 \frac{f}{U} = 4 \frac{\text{Strömungsquerschnitt}}{\text{Umfang}} \quad (4a)$$

einsetzen. Für den ebenen Spalt, also für den Spalt zwischen der Wand des Düsenkörpers und der Trocknungsfläche, der auch hier in Anlehnung an die geometrischen Abmessungen bei Prallstrahlanordnungen als der Bahn-Düsenabstand Z bezeichnet werden soll, folgt demnach aus Gl. (4a) $d_h = 2Z$. Damit ergibt sich $Nu_{dh} = \alpha_{sm} \cdot 2Z/\lambda$ (mit α_{sm} = mittlere Wärmeübergangszahl im Spalt) und $Re_{dh} = w_{sm} \cdot 2Z/\nu$.

Als Spaltlänge L ist die in Strömungsrichtung gesehene wirksame Länge eines Düsenkörpers einzusetzen. Damit kann zunächst einmal nur der Wärmeübergang im Wirkungsbereich der einzelnen Düsenkörper gerechnet werden.

Als wirksame Geschwindigkeit für den Wärmeübergang im Spalt ist nach Gl. (4) für die Re_{dh} -Zahl, wie bereits im Zusammenhang mit der Bestimmungsgleichung für Prallstrahlanordnungen erwähnt wurde, anstatt der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_d eine mittlere Spaltgeschwindigkeit w_{sm} einzusetzen. Die mittlere Spaltgeschwindigkeit ist bei konstanter Düsenaustrittsgeschwindigkeit von verschiedenen Parametern abhängig. Hierzu gehört sowohl die Vorgeschichte der Spaltströmung (z. B. Turbulenzgrad, Druckgradient usw.) als auch in erster Linie die geometrischen Abmessungen des Spaltes zwischen der der Trocknungsfläche abgewandten Wand des Düsenkörpers und der Trocknungsfläche, d. h. also der Bahn-Düsenabstand Z und die Düsenlänge L .

Aus umfangreichen Untersuchungen³ ist bekannt, daß z. B. in einem Bereich des Bahnabstandes Z in der Größenordnung von 2- bis 5fachem der Düsenbreite B die mittlere Geschwindigkeit der Spaltströmung $w_{sm} = 0.5$ bis $0.8 w_d$ beträgt. In der Regel kann mit $w_{sm} = 0.6 w_d$ gerechnet werden. Damit sind alle Größen zur Berechnung der mittleren Wärmeübergangszahl im Düsenpalt nach Gl. (4) bekannt. Natürlich ist diese Wärmeübergangszahl nicht allein für die ganze Trocknerlänge maßgebend. Zur Erfassung der zwischen den einzelnen Düsenkörpern wirksamen Wärme-

³ Solche Untersuchungen wurden im L & E Technikum u. a. auch an Überström-Schwebedüsen, also bei Strömungsverhältnissen nach dem Coanda-Prinzip bis zu Düsenaustrittsgeschwindigkeiten von $w_d = 70$ [m/s] vorgenommen. Darüber soll später an einer anderen Stelle ausführlich berichtet werden. Dabei konnten — hier nur kurz erwähnt — mit Hilfe einer speziell entwickelten Feinsonde sowohl auf einer, die Trocknungsfläche simulierenden starren Oberfläche, als auch auf einer elastischen, in Schwebelage gehaltenen Papierbahn örtliche statische Druckverteilungen gemessen werden. Ferner war es möglich, mit Hilfe einer ausgesprochen dünnen Kanüle (ca. 1 mm Außendurchmesser) direkt im Spalt den Gesamtdruck örtlich entlang der Wand nach der sog. Prestonrohr-Methode (vgl. z. B. [5]) zu messen. Aus diesen Messungen konnten Aufschlüsse über die örtlichen Spaltgeschwindigkeiten bei verschiedenen Parametern sowie auch indirekt qualitativ über den Verlauf der örtlichen Wärmeübergangszahl gewonnen werden. Sämtliche Meßwerte wurden mit Hilfe einer mikroprozessorgesteuerten Meßwertersfassungsanlage automatisch aufgenommen und zugleich ausgewertet.

und Stoffübergangsverhältnisse kann — in Ermangelung von fundierten experimentellen Untersuchungen an solchen Überström-Schwebedüsenkörpern in der einschlägigen Literatur — von Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffüberganges in sog. „Wandstrahlen“ ausgegangen werden. Die Bezeichnung „Wandstrahl“ wird im Schrifttum für Freistrahlen benutzt, die nur auf einem Teil ihres Umfanges kontinuierlich durch eine feste Wand begrenzt sind. Zur Verdeutlichung der Strömungsbereiche sei auf Abb. 4 verwiesen.

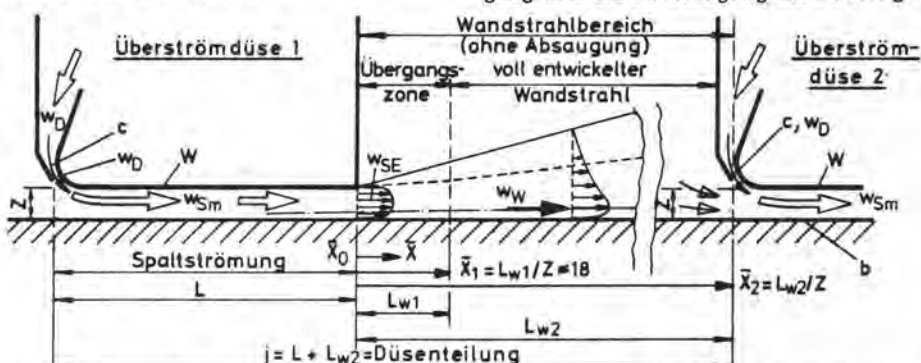


Abb. 4: Schematische Darstellung der verschiedenen Strömungsbereiche von Überström-Schwebedüsen. c = Coanda-Strahl; w = Düsenwand; b = Bahn; Z = Bahn — Düsenabstand; w_d ; w_{sm} ; w_{se} ; w_w Düsenaustritts-, mittlere Spalt-, Spaltend- bzw. Wandstrahl- und örtliche Wandstrahl-Geschwindigkeit

Der Bereich des Wandstrahles fängt unmittelbar hinter dem Spaltende zwischen der Düsenwand und der Trocknungsfläche an und erstreckt sich bis zum Einlauf der nächsten Überström-Schwebedüse. Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, daß die Gesetzmäßigkeiten der Strömung in diesem Bereich — und damit auch die Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffüberganges — nur im geringen Umfang durch die Verhältnisse im Spalt vorbeeinflusst werden; d. h. mit anderen Worten, daß die aus der Literatur für die Wandstrahlen bekannten Zusammenhänge in erster Linie unabhängig von der Spaltlänge L auch hier verwendet werden dürfen. Das geht insbesondere aus einer Untersuchung von Akfirat [11] hervor, in der u. a. auch gezeigt wurde, daß die Spaltlänge L (kurze oder lange Düsenwand) keinen signifikanten Einfluß auf den Verlauf der örtlichen Wärmeübergangszahl ausübt.

Das Spaltende kann wie ein neuer Düsenaustritt angesehen werden, dessen Strömungsgeschwindigkeit, d. h. also die Spaltendgeschwindigkeit w_{se} als charakteristische Strömungsgeschwindigkeit für den Wandstrahl — von jetzt ab Wandstrahlgeschwindigkeit w_{se} genannt — in die folgenden Gleichungen eingesetzt werden muß. Obwohl diese Wandstrahlgeschwindigkeit kleiner als die vorher definierte mittlere Spaltgeschwindigkeit w ist, soll sie in erster Näherung einfachheitshalber der mittleren Spaltgeschwindigkeit w_{sm} gleichgesetzt werden; es gilt also $w_{se} = w_{sm}$.

Der Verlauf der örtlichen Wärme- bzw. Stoffübergangszahlen eines Wandstrahles wurde in Abhängigkeit von mehreren Parametern wie z. B. Abmessungen, Turbulenzgrad usw. und auch im Vergleich mit Voruntersuchungen von Dritten von Akfirat [11] sowie von Mabuchi und Kumada [12] eingehend untersucht. Die von diesen Autoren für die örtlichen Wärme- bzw. Stoffübergangszahlen aufgestellten empirischen Gleichungen sollen hier — nach ei-

ner Integration — zur Ermittlung der mittleren Wärmeübergangszahl α_w zwischen den einzelnen Überström-Schwebedüsenkörpern herangezogen werden. Auch hier wird, wie bei Prallstrahlen, der Einfluß der Absaugung zwischen den Überström-Schwebedüsen auf den Wärmeübergang außer Acht gelassen, da Untersuchungen mit und ohne Absaugung in der Literatur bisher nicht bekannt geworden sind.

Ohne näher darauf einzugehen, sei hier zum Verlauf der örtlichen Wärmeübergangszahl ohne Absaugung nur so viel ge-

sagt, daß im Wandstrahlbereich in der Regel vom Spaltende ab nach Durchlaufen eines Minimums bei ca. $\bar{x} = Lw/Z = 4$ bis zu einem dimensionslosen Abstand von ca. $\bar{x} = Lw/Z = 16$ ein Anwachsen der örtlichen Wärmeübergangszahl entlang der Trocknungsfläche zu erwarten ist. Das Minimum kann sich bei längeren Düsenwänden nach [11] auch kurz vor dem Spaltende, d. h. bereits im Spalt befinden. Nach Durchlaufen des Maximums bei ca. $Lw/Z = 16$, dessen Lage von der Re -Zahl nur unbedeutend abhängig ist, fällt schließlich die örtliche Wärmeübergangszahl stromabwärts entlang der weiteren Trocknungsfläche — ungestörter Strömungsablauf vorausgesetzt — ständig ab, da sich die Strömung in diesem weit abwärts liegenden Wandstrahlbereich normaler Weise stark verzögert. Im Bereich des voll entwickelten Wandstrahles mit einer abfallenden örtlichen Wärmeübergangszahl α_w gilt für die mittlere Wärmeübergangszahl α_{wm} mit $Nu_{wm} = \alpha_{wm} \cdot Z/\lambda$

$$Nu_{wm} = 0.25 Re_w^{0.8} (\bar{x}_2^{4/3} - \bar{x}_1^{4/3}) / (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) \quad (5)$$

Die Gl. (5) ist in den Grenzen von $\bar{x}_1 = Lw_1/Z = 18$ bis ca. $\bar{x}_2 = Lw_2/Z = 200$ und für $Re_w = w_{se} \cdot Z/\nu = 1000$ bis 38000 zur Berechnung der mittleren Wärmeübergangszahl α_{wm} in einem wesentlichen Teilbereich des Wandstrahles geeignet.

Im Übergangsbereich des Wandstrahles von $\bar{x} = 0$ bis ca. $\bar{x} = Lw/Z = 18$ kann für den mittleren Wärmeübergang eine nach Gl. (5) gerechnete mittlere Wärmeübergangszahl — in den Grenzen $\bar{x} = 18$ bis ca. $\bar{x} = 80$ — eingesetzt werden. Das bedeutet, daß die mittlere Wärmeübergangszahl $\alpha_{mü}$ der Gesamtstrecke j zwischen zwei benachbarten, primären Überström-Schwebedüsen, welche der Düsenteilung j bei Prallstrahlidüsen entspricht, sich mit ausreichender Genauigkeit angenähert als arithmetischer Mittelwert zwischen der mittleren Wärmeübergangszahl α_{sm} der Spaltströmung — Gl. (4) — und der mittleren Wärmeübergangszahl α_{wm} des Wand-

strahles errechnen läßt; d. h., es gilt $\alpha_{m0} = (\alpha_{sm} + \alpha_{wm})/2$.

Es ist darauf zu achten, daß als untere Grenze nach Gl. (5) $\bar{x} = 18$ nicht unterschritten wird — genauer eigentlich $\bar{x} = 20$ — und in den Fällen, in denen eine Berechnung für $\bar{x} < 18$ notwendig sein sollte — z. B. wenn die nächste Überström-Schwebdüse in geringerer Entfernung als $\bar{x} = Lw/Z = 18$ angeordnet wird —, dann als Wärmeübergangsgleichung in diesem Wandstrahlbereich folgende Gleichung für die maximale Wärmeübergangszahl α_h (gültig für ca. $\bar{x} = L/Z = 16$ mit $Nu_h = \alpha_h \cdot Z/\lambda$ und $Re_h = w_{SE} \cdot Z/\nu$) eingesetzt wird:

$$Nu_h = 0.064 Re_h^{(2/3)} Pr^{0.43} \quad (6)$$

Auf der Grundlage dieser Rechenvorschrift, die eine differenzierte Berücksichtigung der verschiedenen Strömungsbereiche bei zumindest wichtigsten Vertretern der Überström-Schwebdüsen ermöglicht, solange keine direkten, experimentell gesicherten Ergebnisse von Wärmeübergangsuntersuchungen an Gesamtsystemen vorliegen, ist der Einfluß der Düsen-Anordnung und der Geometrie auf die Trocknungsgeschwindigkeit bei Überström-Schwebdüsen im Vergleich zu den Prallstrahl-Schwebdüsen-Anordnungen mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit gegeben.

Ein energetischer Vergleich zwischen den verschiedenen Trocknersystemen muß sinnvollerweise bei genauerer Kenntnis der die Trocknung beeinflussenden Haupteinflußgrößen geschehen. Durch Produktionsdaten wie Arbeitsbreite, Bahngeschwindigkeit, Auftragsmenge, Anfangs- und Endfeuchtigkeit, usw. ist vorgegeben, wie groß die mittlere Trocknungsgeschwindigkeit g_{Dm} in $[kg/m^2 \cdot h]$, die in der Praxis Trocknungsrate bzw. auch spezifische Verdunstungsleistung genannt wird, sein muß.

Es ist hier nicht beabsichtigt, die theoretischen Grundlagen der Trocknung zu erörtern, wozu auch eine Menge experimentelle Untersuchungen wie z. B. Trocknungsverlaufskurven usw. gehören. Vielmehr sei hier im Zusammenhang mit der Konvektionstrocknung nur darauf hingewiesen, daß bekanntlich — z. B. [1] — je nach den zu trocknenden Gütern in der Regel zwischen zwei oder drei Trocknungsabschnitten unterschieden wird, von denen in erster Linie nur der erste Trocknungsabschnitt zur Auslegung eines Konvektionstrockners, wie z. B. Prallstrahl- oder Überström-Trockner, herangezogen werden kann.

Es ist auch ohne Fachkenntnisse jedem geläufig — denkt man z. B. an die Intensität der Wäschetrocknung auf der Wäscheleine draußen, an einem windigen und zugleich sonnigen Tag —, daß als Haupteinflußgrößen bei der Konvektionstrocknung Luftgeschwindigkeit und die Temperatur in Frage kommen, so daß für einen anschaulichen und energetisch richtigen Vergleich zwischen den Prallstrahl- und Überströmtrocknern die Trocknungsgeschwindigkeit in erster Linie in Abhängigkeit von diesen beiden Größen angegeben werden muß.

Diese Abhängigkeiten sind implizit durch Gl. (1) gegeben. Der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit — hier die Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D — ist über die Wärme α —, bzw. Stoffübergangszahl β wirksam. Der Einfluß der Lufttemperatur ist

nicht nur allein durch die im Nenner der Gl. (1) stehende mittlere Temperatur T , sondern auch über die Stoffgrößen sowie über die Partialdrücke (Konzentrationsgefälle) in komplizierter Weise vorhanden. Hinzu kommt noch der eingangs erwähnte Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur t_L und der Oberflächentemperatur t_w , der über das Verhältnis (α/β) der Wärme- und Stoffübergangszahlen zuerst ermittelt werden muß.

Wenn auch diese Zusammenhänge aufgrund der wechselseitigen Beziehungen nicht leicht — vor allem ohne ein entsprechendes Rechenprogramm — zu berechnen sind, so führen sie für Praxisanwendungen mit einigen Vereinfachungen — z. B. Annahme einer mittleren Oberflächentemperatur über die Trocknerlänge, gleichmäßig verteilte Flüssigkeitsschicht auf der gesamten Trocknungsfläche usw. — doch noch zu gut brauchbaren Ergebnissen.

Viel komplizierter und erheblich schwieriger zu berechnen, zumindest mit einem für den in der Praxis tätigen Konstrukteur nicht relevanten Rechenaufwand, sind die Verhältnisse, wenn der gesamte Verlauf der Trocknungskurve mit zweitem und drittem Trocknungsabschnitt vorab zur Auslegung des Trockners zugrundegelegt werden soll. Die Trocknungsverlaufskurven von vielen Trocknungsgütern sind nicht bekannt. Eine genauere Berechnung ist aufgrund von bekannten Trocknungsverlaufskurven von Voruntersuchungen an Laboranlagen in der Regel nur unter Einsatz von umfangreichen Rechenprogrammen mit EDV-Anlagen großer Speicherkapazität möglich. Ob und wie weit ein solcher Aufwand lohnend ist, um z. B. bei einem vorher aus den Voruntersuchungen an Laboranlagen bekannten Verlauf der Trocknungskurve die Verhältnisse unter Praxisbedingungen wirklichkeitsnahe zu beschreiben, um letzten Endes den Trockner noch genauer auslegen zu können, müßte fallspezifisch entschieden werden. In speziellen Fällen ist sicherlich ein größerer Aufwand mit entsprechenden Entwicklungsarbeiten erforderlich und auch gerechtfertigt.

Es ist aber in vielen Fällen auch ohne die Kenntnis des genauen Verlaufes der Trocknungskurve möglich, aufgrund von anderen, prinzipiell ähnlichen Verläufen den abfallenden Ast der Kurven angenähert geradlinig verlaufend anzunehmen, so daß trapezförmige Verläufe entstehen, bei denen der Zusammenhang zwischen dem integralen Mittelwert der Trocknungsgeschwindigkeit, d. h. der mittleren Trocknungsgeschwindigkeit g_{Dm} und der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit g_{D1} im ersten Trocknungsabschnitt — Gl. (1) —, durch eine einfache Beziehung erfaßt werden kann. Es kann dann auf diese Weise gezeigt werden, daß z. B. bei einem sehr kurzen ersten Trocknungsabschnitt — oder wenn nahezu kein erster Trocknungsabschnitt vorhanden sein sollte — angenähert

$$g_{Dm} = 0.5 g_{D1} \text{ bzw. } g_{D1} = 2 g_{Dm}$$

gilt. Mit anderen Worten: bei einem extrem ungünstigen Trocknungsgut oder extrem geringen Auftragsmassen mit einem sehr kurzen ersten Trocknungsabschnitt müßte mit dem auszulegenden Trockner ein fast doppelt so hoher Wert der erforderlichen mittleren Trocknungsgeschwindigkeit als

Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Trocknungsabschnitt — Gl. (1) — verwirklicht werden, damit eben die zur Erreichung der Produktionsdaten erforderliche mittlere Trocknungsgeschwindigkeit g_{Dm} tatsächlich erreicht werden kann.

Normalerweise kann davon ausgegangen werden, daß z. B. bei lösemittelhaltigen Druckfarben beim Einsatz von Bindemitteln mit geringen Retentionszeiten $g_{Dm} = 0.7$ bis $0.8 g_{D1}$ beträgt.

Im folgenden Abschnitt werden auf der Basis der hier in groben Zügen aufgezeigten theoretischen Grundlagen und unter Anwendung der Teilergebnisse einer früheren Arbeit [6] die wichtigsten Ergebnisse einer neuen theoretischen Untersuchung bei der Trocknung von toluolhaltigen Farbaufträgen (z. B. Tiefdruckfarbe oder Streichfarbe) mittels Prallstrahl- und Überström-Schwebetrocknern mitgeteilt.

Hierzu wurde ein neues Rechenprogramm entwickelt. Die Ergebnisse werden anhand von Kurven diskutiert, welche als Beispiel zu einer gezielten Auslegung von Trocknern dienen und zugleich erstmalig die Grundlagen zu einem echten energetischen Vergleich zwischen den beiden Trocknergruppen liefern sollen.

4.2. Vergleich zwischen Prallstrahl- und Überström-Schwebetrocknern am Beispiel der Trocknung von toluolhaltigen Farbaufträgen

Im Abschnitt 4.1 wurde im Rahmen der theoretischen Grundlagen gezeigt, daß als einer der Hauptfaktoren ursächlich die Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D über die mittleren Wärme- bzw. Stoffübergangszahlen die Trocknungsgeschwindigkeit g_{D1} beeinflusst. Der Einfluß der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D bei zwei verschiedenen Bezugstemperaturen T auf die mittlere Wärmeübergangszahl α_m ist aus Abb. 5 zu entnehmen.

Dabei wurde die Düsengeometrie als Beispiel mit den in Abb. 5 angegebenen geometrischen Abmessungen so gewählt, daß die Düsenbreite B , Düsenteilung j und der Bahn-Düsenabstand Z zu einem eindeutigen Vergleich für beide Düsen systeme gleich groß sind. Für den Vergleich wurde ferner als mittlere Geschwindigkeit der Spaltströmung $w_{sm} = .8 w_D$ angesetzt, ein Wert, der bei dem verhältnismäßig eng gewählten Bahnabstand von $Z = 2.5$ mm durchaus realistisch ist.

Es sei daran erinnert, daß bei Prallstrahldüsen die Bestimmungsgleichungen unabhängig von einer etwaigen Düsenwand w , z. B. in einer ähnlichen Art wie bei Überströmdüsen nach Bild 4, d. h. also mit oder ohne Düsenwand Gültigkeit besitzen, so daß die notgedrungen getrennte Betrachtungsweise des Wärmeüberganges bei Überströmdüsen in verschiedenen Strömungsbereichen (Spaltströmung, Wandstrahl usw.) bei Prallstrahlen nicht nötig ist. Mit anderen Worten ist bei Prallstrahlen für eine gegebene Düsenteilung j ohne irgendwelche Zwischengrößen die mittlere Wärmeübergangszahl eindeutig zu berechnen.

Der Vergleich in Abb. 5 zeigt, daß in einem praktisch relevanten Bereich der Düsenaustrittsgeschwindigkeit von $w_D = 30$ bis 70 $[m/s]$ die mittleren Wärmeübergangszahlen α_{mp} der Prallstrahlanordnung (Kurven 1a

und 1b) durchweg höher liegen als die mittleren Wärmeübergangszahlen $\alpha_{mü}$ der Überströmdüsen-Anordnung (Kurven 2a und 2b). Der Unterschied ist dabei um so höher, je größer die mittlere Temperatur T [K] als Bezugstemperatur für die Stoffgrößen gewählt wird. Aus Abb. 5 ist ferner zu

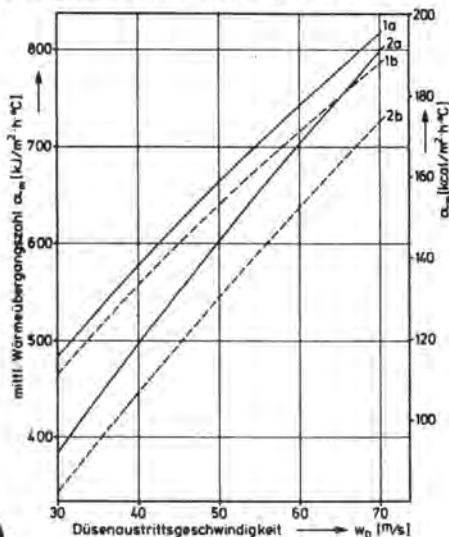


Abb. 5: Einfluß der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D auf die mittlere Wärmeübergangszahl α_m bzw. $\alpha_{mü}$.
(1a, b): α_{mp} = Prallstrahldüsen; (2a, b): $\alpha_{mü}$ = Überströmdüsen bei verschiedenen Bezugstemperaturen T [K] — mit $T = (T_1 + T_2)/2$ als mittlere Temperatur —. Kurven 1a und 2a: $T = 320$ [K]; 1b und 2b: $T = 372$ [K]. Düsenbreite $B = 2.5$ mm; Düsenteilung $j = 200$ mm; Bahnabstand $Z = 2.5$ mm; (Überströmdüse; Spaltlänge $L = 100$ mm; Wandstrahlänge — Abstand zwischen den Überströmdüsen — L_{w2} ; $L_{w2} = 100$ mm; $j = L + L_{w2} = 200$ mm. mittlere Spaltgeschwindigkeit $w_{sm} = 0.8 w_D$.

entnehmen, daß die Wärmeübergangszahl sich mit Erhöhung der Bezugstemperatur etwas verschlechtert, d. h. auch ein Einfluß der Temperatur vorhanden ist. Der Temperatureinfluß wird als eine der Haupteinflußgrößen in den nachfolgend zu behandelnden Kurvendiskussionen im Zusammenhang mit der Trocknungsgeschwindigkeit voll berücksichtigt, so daß an dieser Stelle nicht darauf eingegangen werden muß.

Es erhebt sich die Frage, ob und gegebenenfalls wann eventuell bei Überströmdüsen der Wärmeübergang größer sein kann als bei Prallstrahldüsen. Ein Hinweis in dieser Richtung ist in Abb. 6 enthalten. Dort sind die Wärmeübergangszahlen für beide Anordnungen mit der gleichen Düsenbreite $B = 2.5$ mm, Düsenteilung $j = 200$ mm und mit einem praxisrelevanten Bahn-Düsenabstand $Z = 5$ mm sowie für den Fall der Überströmdüse mit der mittleren Spaltgeschwindigkeit w_{sm} als Parameter in Abhängigkeit von der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D dargestellt. Dabei stellt Kurve 1, wie auch in Abb. 5, den Zusammenhang für den Wärmeübergang bei Prallstrahldüsen dar. Da der mittlere Wärmeübergang bei Prallstrahlanordnungen in einem gewissen Bereich des Bahnabstandes als nahezu unabhängig vom Bahnabstand Z ist, ist sie praktisch identisch mit der Kurve 1b nach Abb. 5.

Bei einem Bahnabstand von $Z = 5$ mm ist als mittlere Spaltgeschwindigkeit w_{sm} normalerweise ca. $w_{sm} = .7 w_D$ zu erwarten. Würde man jedoch als hypothetischen Fall $w_{sm} = w_D$ (Kurve 2a) einsetzen, so ist im Vergleich zur Prallstrahl-Kurve 1 ab einer Düsenaustrittsgeschwindigkeit von $w_D = 40$ [m/s] mit Erhöhung der Düsenaustritts-

geschwindigkeit ein höherer Wärmeübergang für den Fall der Überströmdüse festzustellen.

Ähnlich sind die Verhältnisse auch bei noch kleineren Bahnabständen, wo näherungsweise $w_{sm} = .8$ bis $.9 w_D$ eher erfüllt sein kann. Es ist aber aus Praxisausführungen und aus eigenen Messungen an Überström-Schwebedüsen bekannt, daß der Bahn-Düsenabstand Z von einer schwebend geführten Bahn in nahezu fast allen Betriebsfällen im Mittel nicht kleiner wird als ungefähr $Z = 4$ bis 5 mm und außerdem auch bei sehr kleinen Bahnabständen fast ausschließlich $w_{sm} < .9 w_D$ gilt.

Aufgrund der bisherigen Ausführungen kann nunmehr als ein wichtiges Ergebnis aus den Abb. 5 und 6 festgehalten werden, daß bei sonst gleichen Bedingungen Prallstrahlanordnungen in nahezu allen praktischen Fällen höheren Wärmeübergang gegenüber den Überströmdüsen aufweisen.

Wie sich der Wärmeübergang bei Überströmdüsen im Vergleich zu den Prallstrahldüsen mit Verringerung der wirksamen mittleren Spaltgeschwindigkeit w_{sm} bei gegebener Düsenaustrittsgeschwindigkeit weiter verschlechtert, ist durch Kurven (2b, 2c, 2d) in Abb. 6 dargestellt.

Mit einer, bei dieser Spalthöhe (Bahn-Düsenabstand) von $Z = 5$ mm zu erwartenden mittleren Spaltgeschwindigkeit von ungefähr $w_{sm} = .7 w_D$ (Kurve 2c) ergeben sich mittlere Wärmeübergangszahlen für diese Überströmdüsen-Anordnung, die bezogen auf die mittleren Wärmeübergangszahlen der Prallstrahldüsen-Anordnung bei Düsenaustrittsgeschwindigkeiten von z. B. $w_D = 40$ bis 80 [m/s] um rund 25% bis 20% schlechter sind.

Aufgrund der in Abb. 5 und 6 dargestellten Zusammenhänge wurde in erster Linie nur der Einfluß der Düsenaustrittsgeschwindigkeit auf den Wärmeübergang gezeigt. Allein durch diese Zusammenhänge ohne Berücksichtigung des komplizierten Temperatureinflusses auf die Trocknungsgeschwindigkeit ist eine Aussage über die Trocknungsleistung bei verschiedenen Trocknersystemen nicht möglich. Von jetzt ab werden beide Haupteinflußgrößen zusammen in ihrer wechselseitigen Auswirkung auf die Trocknungsgeschwindigkeit diskutiert. Vorher jedoch sind zum besseren Verständnis einige Bemerkungen über eine weitere Einflußgröße, nämlich über die in der Um- und Abluft zugelassene Konzentration des zu verdunstenden Stoffes — hier also Toluoldampfkonzentration in der Abluft — angebracht, welche hier als Parameter eine gewisse Rolle spielt.

Der Einfluß der Dampfkonzentration in der Luft auf die Trocknungsgeschwindigkeit bzw. bei bekannter oder vorgegebener Dampfkonzentration der Partialdruck p_{DL} des Dampfes in der Luft, der über die entsprechenden Gasgleichungen der Gasgesetze für das Dampf-Luftgemisch abhängig von der Temperatur gerechnet werden kann, ist aus der Grundgleichung (1) ersichtlich. Über den Partialdruck p_{DL} und dessen maximale Größenordnung müssen noch gewisse Angaben gemacht werden.

Wenn z. B. aus bestimmten Gründen der Trockner ohne Umluftbetrieb voll in Frischluftbetrieb arbeiten muß, so ist die Konzentration des Lösemitteldampfes in der

Frischluft, bzw. der Partialdruck p_{DL} in Gl. (1) praktisch null. Ein solcher Trocknerbetrieb kann in Sonderfällen der Trocknung durchaus erforderlich oder kundenseitig vorgeschrieben sein, wobei dann allerdings Überlegungen und Möglichkeiten in wirtschaftlicher Hinsicht stark beschränkt wä-

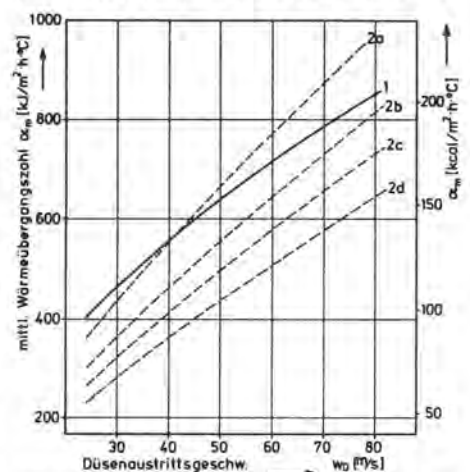


Abb. 6: Einfluß der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D auf die mittlere Wärmeübergangszahl α_m bzw. $\alpha_{mü}$.
(1) α_{mp} = Prallstrahldüsen; (2a, b, c, d) $\alpha_{mü}$ = Überströmdüsen bei verschiedenen mittleren Spaltgeschwindigkeiten w_{sm} . Kurven 2a) $w_{sm} = w_D$; 2b) $w_{sm} = .8 w_D$; 2c) $w_{sm} = .7 w_D$; 2d) $w_{sm} = .6 w_D$. Kurve 1 (w_{sm} nicht relevant für $\alpha_{mü}$ Berechnung. Düsenbreite $B = 2.5$ mm; Düsenteilung $j = 200$ mm; Bahn-Düsen-Abstand $Z = 5$ mm; (Überströmdüse: Spaltlänge $L = 75$ mm; Wandstrahlänge (Abstand zwischen Ü-Düsen) $L_{w2} = 125$ mm).

ren. In diesem Fall erhält man zwar bei sonst gleichen Bedingungen die maximale Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Trocknungsabschnitt, da nach Gl. (1) damit auch das größte Partialdruckgefälle ($p_{D0} - 0$) gegeben ist. Die durch den Umluftbetrieb bedingte Verminderung der Trocknungsgeschwindigkeit wegen der Verminderung des Partialdruckgefälles ist aber in fast allen Praxisfällen bei weitem nicht so hoch, wie vielleicht hin und wieder angenommen wird.

Im Falle der Toluolverdunstung z. B. ist die Höhe der maximal zulässigen Toluolkonzentration nach VDI-Richtlinien 2086 bekanntlich derart festgelegt, daß sowohl MAK-Werte im Arbeitsraum als auch 50% der unteren Explosionsgrenze in Umluft- und Abluftanlagen mit Sicherheit an keiner Stelle und zu keiner Zeit überschritten werden dürfen. Für Toluol beträgt die untere Explosionsgrenze 46 g/m^3 und damit die höchstzulässige Toluolkonzentration 23 g/m^3 . Für den Partialdruck des Toluoldampfes in der Luft erhält man damit z. B. bei $T = 293$ [K] als Grenzwert $p_{DL} = 6.1 \text{ mbar}$ — bzw. 62 mmWS — ferner z. B. bei $T = 393$ [K] $p_{DL} = 8.2 \text{ mbar}$. Mit Rücksicht auf eine wirtschaftliche Lösemittelrückgewinnung oder aber gegebenenfalls auf eine thermische Abluftreinigung soll die Lösemittelkonzentration mittels einer Regelung des Frisch- und Abluftvolumenstromes nach Möglichkeit nahe an diese Grenze kommen. Üblicherweise wird auf Konzentrationswerte von ca. 18 bis 20 g/m^3 geregelt. Mit einem Wert von ca. 19 g/m^3 erhält man bei einer Temperatur von $T = 293$ [K] für den Partialdruck $p_{DL} = 5 \text{ mbar}$. Nicht immer sind allerdings solche Mengen von verdunsteten Lösemitteln zur Aufrechterhaltung von Lösemittelkonzentrationen von ungefähr 18 bis 20 g/m^3 vorzufinden. Zuweilen

werden produktionsbedingt zum größten Teil unabhängig von der Wirksamkeit des Trockners weitaus geringere Lösemittelmengen verdunstet. Zur Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit nach Gl. (1) wurde aufgrund der hier gezeigten Grenzen für den Partialdruck des Toluoldampfes in der Luft ein konstanter Wert von $P_{DL} = 5$ mbar zugrunde gelegt.

Das Rechenprogramm erlaubt natürlich die Berechnung von beliebig höheren Partialdruckwerten — theoretisch fast bis zum Atmosphärendruck, genauer gesagt bis zum jeweiligen variablen Umgebungsdruck als Unter- oder Überdruck —, wobei auch die Abweichungen von der Analogie zwischen dem Wärme- und Stoffübergang, d. h. also die Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der Stoffwerte auf der Grundlage nach [6] voll berücksichtigt werden können.

Nach diesen Erläuterungen über die Größe und den Einfluß des Partialdruckes auf die Trocknungsgeschwindigkeit kann die Erörterung der Trocknungsgeschwindigkeitskurven, nunmehr in erster Linie abhängig von den beiden Haupteinflußgrößen, nämlich der Düsenaustrittsgeschwindigkeit und der Lufttemperatur erfolgen.

Zuerst einmal sollen am Beispiel eines Prallstrahltrockners die Vorzüge der beachteten Darstellungsweise von Kurvenscharen der als Beispiel gewählten Trocknungsgeschwindigkeit von Toluolschichten gezeigt werden. Der Prallstrahltrockner kann dabei ein normaler Prallstrahltrockner als Walzentrockner mit Leitwalzen für Bahnführung sein, bzw. auch ein Prallstrahl-Schwebetrockner bekannter Art — z. B. nach Abb. 2 in [13] —, oder aber ein neuer Prallstrahl-Schwebetrockner, auf dessen konstruktive Hauptmerkmale und Wirkungsweise im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird. Die Bedingung für die Gültigkeit der Berechnung ist, daß die Grundzüge des Prallstrahlprinzips mit charakteristischen Staubereichen bei der konstruktiven und technischen Ausführung des Trockners erhalten bleiben.

Trocknungsgeschwindigkeitskurven für eine energetisch relativ sehr günstige Prallstrahl-Düsenanordnung sind in Abb. 7 dargestellt. Die Düsengeometrie mit einer Düsenbreite von $B = 2$ mm und der Düsenteilung von $j = 120$, d. h. mit einer dimensionslosen Düsenteilung von $j/B = 60$ und einem dimensionslosen Bahnabstand von $Z/B = 1$ bis 8, ist so gewählt, daß für die mittlere Wärmeübergangszahl relativ hohe Werte erreicht werden können. Diese Düsenanordnung ist wegen der verhältnismäßig engen Düsenteilung eher ein Beispiel für einen normalen Prallstrahltrockner mit Leitwalzen für die Bahnführung sowie auch für Prallstrahl-Schwebedüsenkörper mit geringen Breiten in Strömungsrichtung, bei denen die Absaugung der Abluft zwischen den Düsenkörpern konstruktiv und aerodynamisch einwandfrei gelöst sein muß.

Die Kurvenscharen in Abb. 7 sind jeweils für konstante Trocknungsgeschwindigkeiten g_{D1} im ersten Trocknungsabschnitt in einem Bereich von $g_{D1} = 50$ bis 130 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$ dargestellt. Dieselben Kurven gelten jeweils auch für die auf diesen Kurven angeschriebenen Werte der mittleren Trocknungsgeschwindigkeit g_{Dm} unter der Annahme, daß die mittlere Trocknungsge-

schwindigkeit g_{Dm} nur 60% der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit g_{D1} im ersten Trocknungsabschnitt beträgt — ein Verhältnis, welches eher etwas schlechter gewählt wurde — normalerweise für Tiefdruckfarben 70 bis 80% — und wegen der fast immer unbekannten Zusammensetzung des Farbauftrages einen gewissen Sicherheitszuschlag beinhalten soll.

Die durch die hier dargestellten Kurvenscharen gegebenen Informationen sollen anhand einer in Abb. 7 als Beispiel gestrichelt gezeichneten Kurve für eine Trocknungsgeschwindigkeit von $g_{D1} = 70$ $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$ etwas näher erläutert werden.

Zur Erreichung einer mittleren Trocknungsgeschwindigkeit von $g_{Dm} = 42$ $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$, welche z. B. bei einer Bahnbreite = Trocknerbreite von 1000 mm und einer Trocknerlänge von $L = 3000$ mm — Trocknungsfläche $F = 3$ m^2 — eine stündliche Toluolverdunstung von $G_D = F g_{Dm} = 3 \cdot 42 = 126$ $[\text{kg}/\text{h}]$ ergibt, sind bei einem Prallstrahltrockner mit dieser Düsengeometrie beispielsweise die folgenden 3 Wertepaare der Lufttemperatur t_L und der Düsenaustrittsgeschwindigkeit w_D erforderlich:

- 1) $t_L = 106^\circ \text{C}$; $w_D = 25$ $[\text{m/s}]$ bzw. 2) $t_L = 80^\circ \text{C}$; $w_D = 40$ $[\text{m/s}]$ bzw. 3) $t_L = 70^\circ \text{C}$; $w_D = 52,5$ $[\text{m/s}]$

Welches Wertepaar — hohe Lufttemperatur, niedrige Düsenaustrittsgeschwindigkeit und damit auch geringer Volumenstrom oder umgekehrt — sinnvollerweise verwirklicht wird, soll an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden. Hauptsache ist, daß durch diese Kurvenscharen die zur Erreichung einer mittleren Trocknungsgeschwindigkeit erforderlichen Lufttemperaturen und Düsenaustrittsgeschwindigkeiten abhängig von ihrer wechselseitigen Beziehung zueinander genau bekannt sind. Bei einer gegebenen Bahnbreite — und damit auch der gegebenen Trocknerbreite — sowie einer stündlich zu verdunstenden Gesamtlösungsmenge G_D sind dann auch die Wahl der Gesamttrocknerlänge in Abhängigkeit der notwendigen Lufttemperaturen und der Düsenaustrittsgeschwindigkeit

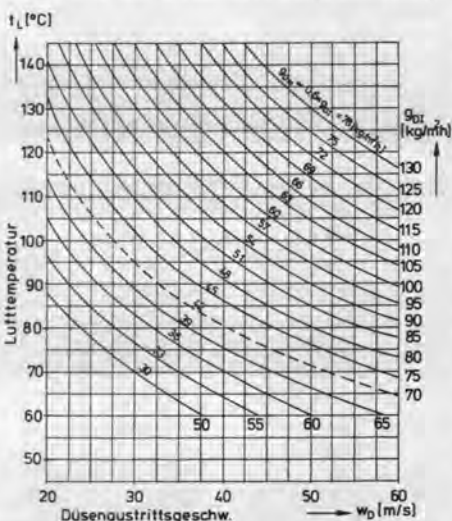


Abb. 7: Trocknungsgeschwindigkeitskurven für toluolhaltigen Farbaufträgen bei einer bestimmten Prallstrahl-Düsenanordnung.

Düsenbreite $B = 2$ mm; Düsenteilung $j = 120$ mm; $j/B = 60$ Bahn-Düsenabstand $Z = 2$ bis 16 mm; mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0,6 g_{D1}$ $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$ mit g_{D1} = Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Trocknungsabschnitt; t_L = Lufttemperatur; w_D = Düsenaustrittsgeschwindigkeit

keiten und damit auch Luftmengen samt Wärmebilanzen für die gewählten Düsenanordnungen und Trocknersysteme eindeutig und genau vergleichbar bekannt.

Ohne näher darauf einzugehen, sei noch einmal in Erinnerung gebracht, daß aus der programmierten Berechnung aufgrund der gekoppelten Zusammenhänge natürlich auch die jeweiligen Oberflächentemperaturen t_w bekannt sind, so daß recht genaue Wärmebilanzen aufgestellt werden können.

In den Abb. 8 und 9 sind Trocknungsgeschwindigkeitskurven für weitere Prallstrahlanordnungen dargestellt, bei denen die Düsenbreite B und die Düsenteilung j im Hinblick auf die fertigungstechnischen Gesichtspunkte und eine einwandfrei sichere Absaugung etwas größer gewählt wurden. Dadurch ist zwar eine gewisse Verschlechterung der optimalen Verhältnisse — insb. bei der Düsengeometrie nach Abb. 9 mit $B = 4$ mm und $j = 240$ mm z. B. gegenüber der durch Abb. 7 gegebenen Düsengeometrie in Kauf zu nehmen. Dafür sind bei den noch zu besprechenden neuen Prallstrahl-Schwebedüsen, die die in Abb. 8 angegebenen geometrischen Abmessungen aufweisen und bei denen eindeutige Abströmverhältnisse vorliegen, sehr gute Bahnführungen gegeben.

Um den Einfluß der Düsenbreite B auf die Trocknungsgeschwindigkeit besser zeigen zu können, wurde in den Abb. 7 bis 9 die dimensionslose Düsenteilung mit $j/B = 60$ konstant gehalten. Das bedeutet, daß z. B. bei dem vorher gewählten Beispiel der mittleren Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 42$ $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$ bei einer Gesamttrocknerlänge von $L = 3000$ mm sowie einer konstanten Düsenaustrittsgeschwindigkeit von z. B. $w_D = 40$ $[\text{m/s}]$ und damit bei gleichem Volumenstrom für die drei verschiedenen Düsengeometrien bei gleicher Trocknerbreite und Länge zur Erreichung einer mittleren Trocknungsgeschwindigkeit von $g_{Dm} = 42$ $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$ eine Lufttemperatur von jeweils $t = 80^\circ \text{C}$, 88°C bzw. 105°C erforderlich ist.

Aus diesem Vergleich der verschiedenen Prallstrahlanordnungen geht hervor, daß eine Düsenbreite von $B = 4$ mm eigentlich nicht mehr als günstig anzusehen ist.⁴ Eine solche Anordnung wäre natürlich dort angebracht, wenn aus besonderen Gründen größere Bahn-Düsenabstände erforderlich sein sollten. Es ist nämlich trotz der im Vergleich mit kleineren Düsenbreiten schlechteren Trocknungsleistung nicht zu verkennen, daß diese Trocknungsleistung bis zu einem verhältnismäßig großen Bahn-Düsenabstand von ca. $Z = 32$ mm angenähert konstant bleibt. Auch auf diesen, bei anderen Trocknertypen — z. B. bei Überström-trocknern — keineswegs vorhandenen Vorzug der Prallstrahltrockner sollte in diesem Zusammenhang hingewiesen werden.

Beliebige weitere Vergleiche in dieser Art können nunmehr mit Hilfe von solchen Kur-

⁴ Diese Feststellung gilt strenggenommen nur für „turbulente“ Düsenstrahlen, so wie sie bei vielen Industrieauführungen ohne besondere strömungstechnische Maßnahmen und spezielle Düsenformen normalerweise Turbulenzgrade in der Größenordnung von ca. 2,5 bis 6% und noch mehr am Düsenaustritt aufweisen. Bei turbulenzarmen Düsenstrahlen mit Turbulenzgraden von z. B. 0,3 bis 0,7% ist eine ähnliche Verschlechterung erst bei viel größeren j/B -Werten gegeben [5], so daß durch besonders strömungsgünstige Düsenformen bei etwas schlechterem Wärmeübergang auch breitere Düsen mit gutem Erfolg eingesetzt werden können.

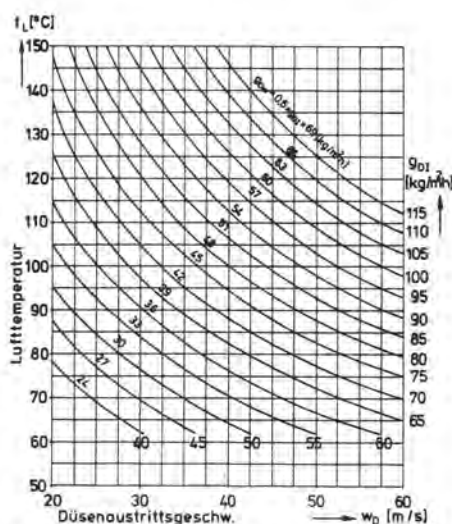


Abb. 8: Trocknungsgeschwindigkeitskurven von toluolhaltigen Farbaufträgen bei einer bestimmten Prallstrahl-Düsenanordnung.

Düsenbreite $B = 2.5$ mm; Düsenteilung $j = 150$ mm; $j/B = 60$; Bahn-Düsenabstand $Z = 3$ bis 20 mm; mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0.6 g_D$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$] mit g_D = Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Trocknungsabschnitt; t_L = Lufttemperatur; w_D = Düsenausstrittsgeschwindigkeit

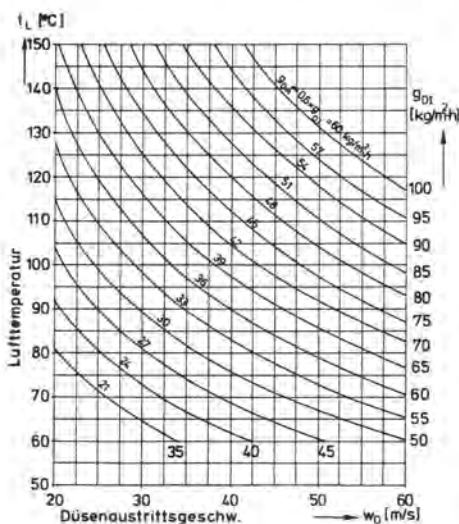


Abb. 9: Trocknungsgeschwindigkeitskurven von toluolhaltigen Farbaufträgen bei einer bestimmten Prallstrahl-Düsenanordnung.

Düsenbreite $B = 4$ mm; Düsenteilung $j = 240$ mm; $j/B = 60$; Bahn-Düsenabstand $Z = 4$ bis 32 mm; mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0.6 g_D$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$] mit g_D = Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Trocknungsabschnitt; t_L = Lufttemperatur; w_D = Düsenausstrittsgeschwindigkeit

verschiedenen vorgenommen werden, mit dem Vorteil, daß die Trocknerauslegung und der Vergleich unter verschiedenen Anordnungen und Systemen zuverlässig durchgeführt werden können. Damit ist auch für Laien eine einfache Vergleichsmöglichkeit gegeben; denn das im vorigen Abschnitt etwas primitiv angedeutete Beispiel der Wäschetrocknung mit Sonne und Wind dürfte mit diesen Diagrammen verständlich verwirklicht worden sein.

Im folgenden werden nun Prallstrahl- und Überströmtrockner bei gleicher Düsenbreite B , Düsenteilung j und gleichem Bahn-Düsenabstand Z auf die bisherige Art und Weise miteinander verglichen.

Zuerst wird in Anknüpfung an den eben erwähnten Einfluß des Bahn-Düsenabstandes auf die Trocknungsgeschwindigkeit bei Überström-Schwebedüsen in Abb. 10 die Größenordnung dieses Einflusses gezeigt. Die Berechnung wurde für eine Trocknungsgeschwindigkeit $g_{D1} = 50$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$], welche wieder unter der Annahme für die mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0.6 g_{D1}$ für $g_{Dm} = 30$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$] gültig ist, mit einer Düsenbreite $B = 2.5$ mm und einer Düsenteilung $j = 150$ mm durchgeführt. Als Spaltlänge (Breite — in Strömungsrichtung gesehen — des Überström-Düsenkörpers) L wurde $L = 75$ mm und als Wandstrahlänge (Abstand zwischen den Überström-Düsenkörpern) $L_{w2} = 75$ mm gewählt. Mit $j = L + L_{w2} = 150$ mm ist die Düsenteilung auf diese Weise in beiden Fällen gleich. Als Parameter wurde der Bahn-Düsenabstand Z von $Z = 5$ bis 15 mm variiert, welcher in diesem Bereich nur für Überström-Schwebedüsen von Bedeutung ist und für Prallstrahl-Düsen — zumindest in diesem Z/B -Bereich — praktisch keine Rolle spielt. Deswegen ist für die Prallstrahlanordnung auch nur eine Kurve (Kurve 1) in diesem Z/B -Bereich vorhanden.

Die mittlere Spaltgeschwindigkeit w_{sm} wurde bei allen Bahn-Düsenabständen Z zu $w_{sm} = 0.7 w_D$ angesetzt, obwohl dieser Wert angenähert nur für Bahn-Düsenabstände von $Z = 5$ bis ca. 7 mm zutreffend ist. Bei größeren Z -Werten wären eher schlechtere w_{sm} -Werte einzusetzen.

Die Düsenabmessungen sind so gewählt, daß insbesondere für Überströmdüsen (zumindest bei $Z = 5$ mm — Kurve 2d —), wie aus einigen als besonders optimal angesehenen Industrieausführungen bekannt ist, durchaus sehr gute Trocknungsleistungen zu erwarten sind. Die Kurve 2d in Abb. 10 zeigt den zu erwartenden Verlauf zur Erreichung einer Trocknungsgeschwindigkeit von $g_{D1} = 50$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$] bzw. ungefähr $g_{Dm} = 30$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$] bei dieser optimalen Düsengeometrie. Dieser g_{Dm} -Wert ist z. B. bei einer Lufttemperatur von ca. $t_L = 75^\circ \text{C}$ mit einer Düsenausstrittsgeschwindigkeit von $w_D = 50$ [m/s] zu erzielen, was zunächst als durchaus gut bezeichnet werden kann.

Zweifelloos erst im Vergleich mit diesem Überström-Schwebetrockner sieht man die Leistungsfähigkeit und damit auch die Überlegenheit eines Prallstrahl-Schwebetrockners, wenn die für die Prallstrahlanordnung gültige Kurve 1 näher in Betracht gezogen wird. Zur Erreichung der gleichen Trocknungsgeschwindigkeit braucht die Trocknungsluft, wenn die gleiche Düsenausstrittsgeschwindigkeit von $w_D = 50$ [m/s] zugrundegelegt und damit auch bei gleicher Breite und der Länge des jeweiligen Trockners die gleichen Luftmengen benötigt werden, nur auf einen Wert von ca. $t_L = 57^\circ \text{C}$ aufgewärmt zu werden.

Wie sich die Verhältnisse bei größeren Bahn-Düsenabständen für Überström-Schwebedüsen energetisch verschlechtern — z. B. höhere Lufttemperatur bei gleicher Düsenausstrittsgeschwindigkeit —, zeigen die Kurven 2c bis 2a in Abb. 10. Nicht mehr zu verkennen ist die erhebliche Verschlechterung bei Kurve 2a, die mit einem Bahn-Düsenabstand von $Z = 15$ mm eine ziemlich schlechte Überström-Schwebedüsenanordnung darstellt, aber trotzdem in einigen Industrieausführungen noch vorzufinden ist. Bleibt man bei dem Beispiel der gleichen Düsenausstrittsgeschwindigkeit von $w_D = 50$ [m/s], so benötigt eine solche Überström-Düsenanordnung nach Kurve 2a immerhin eine Lufttemperatur von ca. $t_L = 87^\circ \text{C}$, gegenüber der $t_L = 57^\circ \text{C}$ bei der Prallstrahlanordnung, d. h. also 30°C mehr.

Solche oder etwas weniger ausgeprägte Unterschiede wären bei den bekannten Industrieausführungen von verschiedenen Trocknern mit Sicherheit zu finden, wenn echte Vergleiche möglich wären.

Da Überström-Düsenanordnungen bei größeren Bahn-Düsenabständen Z offensichtlich energetisch nicht optimal arbeiten, werden die folgenden Vergleiche mit Prallstrahlanordnungen bei geringeren, aus der

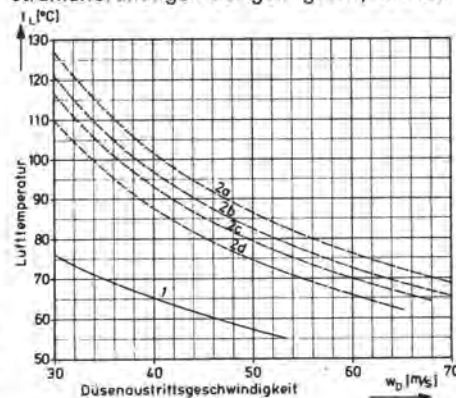


Abb. 10: Vergleich zwischen Prallstrahl-Düsen (Kurve 1) und Überströmdüsen (Kurven 2a; 2b; 2c; 2d) mittels Trocknungsgeschwindigkeitskurven g_{Dm} bzw. g_{D1} von toluolhaltigen Farbaufträgen.

Kurve 1: Bahn-Düsenabstand $Z = 3$ bis 20 mm. Kurve 2a: $Z = 15$ mm; 2b: $Z = 10$ mm; 2c: $Z = 7.5$ mm; 2d: $Z = 5$ mm; Düsenbreite $B = 2.5$ mm; Düsenteilung $j = 150$ mm; $j/B = 60$ (Überströmdüsen: Spaltlänge $L = 75$ mm; $L_{w2} = 75$ mm); mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0.6 g_{D1} = 30$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$]; mittlere Spaltgeschwindigkeit $w_{sm} = 0.7 w_D$; t_L = Lufttemperatur; w_D = Düsenausstrittsgeschwindigkeit

Praxis als optimal bekannten Bahnabständen von $Z = 5$ bis 8 mm durchgeführt.

Von Interesse wäre zu wissen, wie groß der Einfluß der mit einer gewissen Unsicherheit als ein bestimmter Bruchteil der Düsenausstrittsgeschwindigkeit w_D angenommenen mittleren Spaltgeschwindigkeit w_{sm} auf die Trocknungsgeschwindigkeit ist.

In Abb. 11 sind die Ergebnisse einer solchen Betrachtung für eine optimal anzuwendende Düsengeometrie der Überström-Schwebedüsen für drei verschiedene mittlere Spaltgeschwindigkeiten w_{sm} bei der Berechnung von zwei unterschiedlichen mittleren Trocknungsgeschwindigkeiten (Kurven 1: $g_{Dm} = 30$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$] und Kurven 2: $g_{Dm} = 50$ [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$]) dargestellt. Die mittlere Spaltgeschwindigkeit wurde dabei jeweils bei Kurven mit Index üa) zu $w_{sm} = w_D$ mit Index üb) zu $w_{sm} = 0.8 w_D$ und mit Index üc) zu $w_{sm} = 0.6 w_D$ eingesetzt. Wie bereits bekannt ist, ist w_{sm} bei der Berechnung für die Prallstrahlanordnung belanglos, so daß die Prallstrahlkurven 1p) und 2p) einen solchen Index nicht aufweisen. Vergleicht man nun rein hypothetisch den für die Überströmdüsen extrem günstigen Fall bei $w_{sm} = w_D$ (Kurven 1üa bzw. 2üa) mit den Kurven 1p bzw. 2p der Prallstrahl-Düsen, dann stellt man fest, daß zwar Prallstrahl-Düsen immer noch günstiger liegen, aber der Unterschied nicht mehr so groß ist.

Ein solcher Vergleich kann allerdings nur die theoretischen Grenzen der Überströmdüsen aufzeigen und hat praktisch keine Bedeutung. Die wirklichen Verhältnisse sind für diese Düsengeometrie in den durch die Kurven 1üb und 1üc bzw. 2üb und 2üc gegebenen Grenzen zu finden. Auch hierbei schneidet also eine entsprechende Prallstrahl-Düsenanordnung günstiger ab als die Überström-Düsenanordnung.

Ein weiterer Vergleich zwischen den beiden Düsensystemen anhand der Trocknungsgeschwindigkeitskurven ist aus Bild 12 zu entnehmen. Im Unterschied zu Bild 11 wurde hier die Düsengeometrie etwas geändert, und zwar wurden die Berechnungen für die Düsenbreite $B = 2.5$ mm, Düsenteilung $j = 200$ mm, d. h. also $j/B = 80$ und der Bahn-Düsenabstand $Z = 5$ mm durchgeführt.

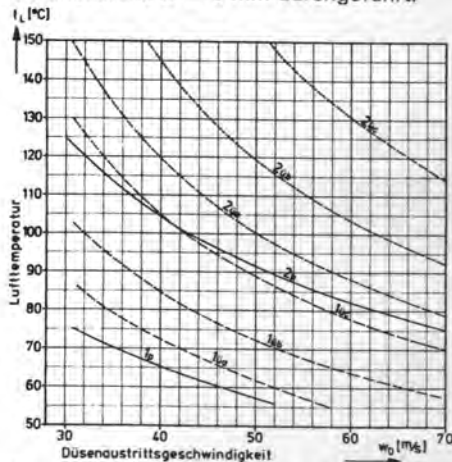


Abb. 11: Vergleich zwischen Prallstrahldüsen (Kurven 1p bzw. 2p) und Überströmdüsen (Kurven 1üa; 1üb; 1üc bzw. 2üa; 2üb; 2üc) mittels Trocknungsgeschwindigkeitskurven g_{Dm} bzw. g_{Dl} von toluolhaltigen Farbaufträgen.

Kurven 1: $g_{Dm} = 30$ [kg/m² h]; Kurven 2: $g_{Dm} = 50$ [kg/m² h]. Indices: p = Prallstrahldüsen; ü = Überströmdüsen; a) $w_{Sm} = w_D$; b) $w_{Sm} = 0.8 w_D$; c) $w_{Sm} = 0.6 w_D$; Düsenbreite $B = 2.5$ mm; Düsenteilung $j = 150$ mm; $j/B = 60$ Bahn-Düsenabstand $Z = 7.5$ mm (für Prallstrahl $Z = 3$ bis 20 mm) (Überströmdüsen: Spaltlänge $L = 75$ mm; $L_{w2} = 75$ mm); mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0.6 g_{Dl}$; t_L = Lufttemperatur; w_D = Düsenaustrittsgeschwindigkeit

Die Vergrößerung der Düsenteilung j bzw. des Verhältnisses j/B von 60 auf $j/B = 80$ hat zwar aus konstruktiven und fertigungstechnischen Gründen sowie wegen besserer Luftrückführung gewisse Vorteile. Durch die damit gekoppelte Verschlechterung der Wärmeübergangszahl ist zur Erreichung der gleichen Trocknungsgeschwindigkeit, wie man aus den Abb. 11 und 12 entnehmen kann, z. B. bei gleicher Düsenaustrittsgeschwindigkeit eine höhere Lufttemperatur, bzw. bei gleicher Lufttemperatur eine höhere Düsenaustrittsgeschwindigkeit erforderlich. Auf der anderen Seite sind zur Erreichung der gleichen Trocknungsgeschwindigkeit — d. h. damit auch bei gleichen Trocknerabmessungen — mit Vergrößerung der Düsenteilung weniger Düsen und damit auch bei gleicher Trocknerlänge eine geringere Luftmenge erforderlich. Diese geringere Luftmenge muß dann entweder mit höherer Düsenaustrittsgeschwindigkeit — höherem Druckverlust — ausgeblasen oder auf höhere Lufttemperatur gebracht werden. Ob und wie weit dabei eine wirtschaftliche — oder auch etwas unwirtschaftliche — Fahrweise des Trockners möglich ist bzw. in Kauf genommen und ob der Trockner dadurch preiswerter gebaut werden kann, muß von Fall zu Fall anhand solcher Trocknungsgeschwindigkeitskurven geprüft werden.

Diese Betrachtungsweise gilt für beide Trocknergruppen. Die grundsätzliche Überlegenheit von Prallstrahldüsen gegenüber den Überströmdüsen wird durch die Kurvenschar in Abb. 12 auch bei dieser Düsengeometrie deutlich. Zur Erreichung der gleichen mittleren Trocknungsgeschwindigkeit

$g_{Dm} = 30$ bzw. 50 [kg/m² h] sind mit Überströmdüsen entweder höhere Lufttemperatur oder höhere Düsenaustrittsgeschwindigkeit und damit auch höherer Energieaufwand erforderlich. Im günstigsten Fall mit einer eigentlich nicht realistischen, sehr hohen mittleren Spaltgeschwindigkeit von $w_{Sm} = 0.8 w_D$ (Kurven 1üa und 2üa) ist auch hier erst bei hohen Düsenaustrittsge-

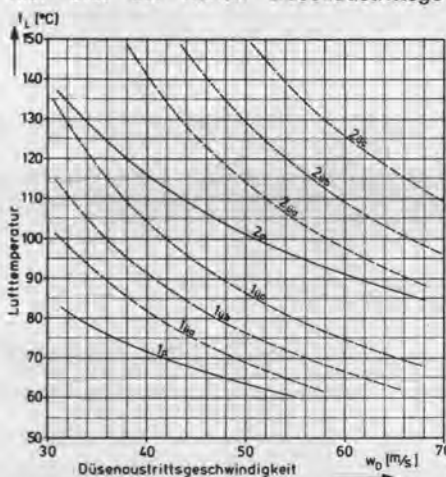


Abb. 12: Vergleich zwischen Prallstrahldüsen (Kurven 1p bzw. 2p) und Überströmdüsen (Kurven 1üa; 1üb; 1üc bzw. 2üa; 2üb; 2üc) mittels Trocknungsgeschwindigkeitskurven g_{Dm} bzw. g_{Dl} .

Kurven 1: $g_{Dm} = 30$ [kg/m² h]; Kurven 2: $g_{Dm} = 50$ [kg/m² h]. Indices: p = Prallstrahldüsen; ü = Überströmdüsen; a) $w_{Sm} = 0.8 w_D$; b) $w_{Sm} = 0.7 w_D$; c) $w_{Sm} = 0.6 w_D$; Düsenbreite $B = 2.5$ mm; Düsenteilung $j = 200$ mm; $j/B = 80$; Bahn-Düsenabstand $Z = 5$ mm (für Prallstrahl $Z = 3$ bis 20 mm) (Überströmdüsen: Spaltlänge $L = 75$ mm; $L_{w2} = 125$ mm); mittlere Trocknungsgeschwindigkeit $g_{Dm} = 0.6 g_{Dl}$; t_L = Lufttemperatur; w_D = Düsenaustrittsgeschwindigkeit

schwindigkeiten eine gewisse Annäherung an die Prallstrahldüsen festzustellen. Mit anderen Worten: Je höher die Düsenaustrittsgeschwindigkeit ist, desto geringer wird die Überlegenheit der Prallstrahlanordnung, wobei das Gleichziehen der beiden unterschiedlichen Düsensysteme erst bei sehr hohen, aus mehreren Gründen in der Praxis normalerweise nicht mehr vorkommenden Düsenaustrittsgeschwindigkeiten vorstatten geht. Es fällt auch auf, daß die Höhe der erforderlichen mittleren Trocknungsgeschwindigkeit von Einfluß ist, und zwar je höher die gewünschte mittlere Trocknungsgeschwindigkeit ist, desto höhere Werte ergeben sich für diese Grenzggeschwindigkeit der Düsenaustrittsgeschwindigkeit.

Diese hier diskutierten Zusammenhänge sind nicht irgendwelche besonderen Erkenntnisse, sondern beruhen einfach darauf, daß zur Berechnung der mittleren Wärmeübergangszahl in beiden Fällen, wie aus dem Abschnitt 4.1 bekannt ist, Bestimmungsgleichungen zugrundegelegt wurden, bei denen Reynolds-Zahl $Re^{0.62}$ (Prallstrahldüsen) und $Re^{0.75}$ (Spaltströmung + Wandstrahl = Überströmdüsen) unterschiedliche exponentielle Abhängigkeiten aufweisen und der Einfluß der 'turbulenteren' Strömung mit einem Exponenten von $n = .75$ bis $.80$ sich erst bei größeren Re-Zahlen bemerkbar macht, wobei dann allerdings rein rechnerisch hohe charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten erforderlich werden, die in der Praxis nur in seltensten Fällen Anwendung finden.

Es wird oft übersehen, daß der Wärmeübergang bei 'turbulenteren' Strömun-

gen mit kleineren Exponenten $n = .5$ bis $.65$ (.70) bei etwas geringeren Re-Zahlen bzw. in Übergangsbereichen der laminar-turbulenten Strömungen aufgrund der sehr hohen Proportionalitätskonstante der Wärmeübergangsgleichung absolut gesehen weit höher liegen kann als bei der 'turbulenteren' Strömung bei gleicher Re-Zahl. Darauf wurde in einem etwas anderen Zusammenhang z. B. bereits von Schlünder [4], aber auch insbesondere im Zusammenhang mit Prallstrahlen in [5] hingewiesen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß durch die hier in vereinfachter Form ohne Berücksichtigung der weiteren Trocknungsabschnitte gerechneten Trocknungsgeschwindigkeitskurven im ersten Trocknungsabschnitt die Haupteinflußgrößen Lufttemperatur und Düsenaustrittsgeschwindigkeit bei verschiedenen Düsenanordnungen getrennt erfaßt werden konnten. Damit konnte sowohl für verschiedene Prallstrahldüsen-Anordnungen untereinander, sei es als normaler Prallstrahl-Walzen-trockner oder als Prallstrahl-Schwebetrockner, als auch im Vergleich mit Überströmdüsen-Anordnungen (hauptsächlich Düsenkörper nach dem Coanda-Strahlprinzip ohne bzw. ohne ausgeprägte Staubbereiche) gezeigt werden, daß optimal ausgelegte Prallstrahl-Düsenanordnungen allen anderen Konvektionstrocknerarten energetisch überlegen sind. Auf diese Weise ist es nunmehr möglich, den Trockner von der Aufgabenstellung her in bezug auf das zu trocknende Gut — z. B. schonende Trocknung bei wenig Hitzeinwirkung oder umgekehrt usw. — und den zu verdunstenden Stoff gezielt zu optimieren, genaue Energiebilanzen aufzustellen und damit auch allein durch die richtige Auswahl des Trockners für die erforderliche und zu garantierende Trocknungsleistung den Gesamtenergieaufwand des Trockners auf ein Minimum zu reduzieren. (Wird fortgesetzt) ◇

Literaturverzeichnis:

- [1] Krischer, O.; Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Aufl. (Trocknungstechnik 1. Band) Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag (1978)
- [2] Kröll, K.: Trockner und Trocknungsverfahren. 2. Aufl. (Trocknungstechnik 2. Band), Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag (1978)
- [3] Kast, W.; Krischer, O.; Reinicke, H.; Wintermantel, K.: Konvektive Wärme- und Stoffübertragung. 1. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1974)
- [4] Schlünder, E.-U.: Einführung in die Wärme- und Stoffübertragung. 1. Aufl. Friedr. Vieweg + Sohn GmbH Verlag, Braunschweig (1972)
- [5] Dosdoğru, G.: Wärmeübergang bei turbulenzarmen Prallstrahlen im Hinblick auf die Optimierung von Trocknern für Druckmaschinen. Diss. Th. Darmstadt, D 17 (1974)
- [6] Dosdoğru, G.: ein Iterationsverfahren zur näherungsweise Berechnung des Verhältnisses der Wärme zur Stoffübergangszahl (α/β). Fortschr.-Ber. VDI-Z Reihe 3, Nr. 42 VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1976)
- [7] Schlünder, E.-U.; Kröttsch, P., und Hennecke, W. Fr.: Gesetzmäßigkeiten der Wärme- und Stoffübertragung bei der Prallströmung aus Rund- und Schlitzdüsen. Chemie-Ing.-Tech. 42, Heft 6 (1970), S. 333-338.
- [8] Gardon, R., and Akfirat, J. C.: Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets. Transactions of the A.S.M.E., Journal of Heat Transfer, No. 65- HT-20 Febr. (1966), S. 101-108.
- [9] Fötke, W.: Wärme- und Stoffübertragung bei der Prallströmung von Freistrahlen mit und ohne Drall. Diss. TU Clausthal (1974)
- [10] Geiger, A.: Die Bahnführung in Schwebetrocknern. Holz als Roh- und Werkstoff 34 (1976), S. 275-279
- [11] Akfirat, J. C.: Transfer of heat from an isothermal flat plate to a two-dimensional wall jet. Proceeding of the "third International Heat Transfer Conference" Aug., (1966) Chicago, Illinois, Papers 41-80, Vol. II, S. 274-279
- [12] Mabuchi, I., and Kumada, M.: Studies on heat transfer to turbulent jets with adjacent boundaries (1st Report, Flow development and mass transfer in plane turbulent wall jet) Bulletin of the JSME, Vol. 15, No. 88, S. 1236-1245
- [13] Dosdoğru, G.: Prallstrahl-trockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern. dpw — Deutsche Papierwirtschaft Heft 3 + 4/1982, S. 200-208 und 174
- [14] Karger, M.; Krizek, F.: Die Stoffübergangszahlen beim Aufprall schräger Flachstrahlen auf eine Platte. Verfahrenstechnik 6 (1972) S. 223-228
- [15] Hausen, H.: Allgem. Wärmetechnik 9 (1959) S. 75-79

Prallstrahltrockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern

Von Dr. Günay Dosdoğru¹

Folge IV (Schluß)

5. Neue Prallstrahl-Schwebetrockner

DIE WESENTLICHEN MERKMALE der aero- und thermodynamischen Grundlagen zur Auslegung von energetisch optimal arbeitenden Prallstrahl-Schwebetrocknern wurden in den vorangegangenen Abschnitten 2 bis 4 (13) behandelt. Bei der konstruktiven Ausführung eines solchen Trockners müssen die wesentlichen Merkmale unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Gesichtspunkte verwirklicht werden. Zur Vermeidung einer teuren Fertigung sind dabei gewisse Kompromisse durch die konstruktive Ausführung des Trockners zu schließen. Es ist aber zu beachten, daß keines der wichtigsten Details des Prallstrahlprinzips verlorengeht. So muß z. B. durch einen scharfkantigen Düsenaustritt dafür Sorge getragen werden, daß eine Umlenkung des Düsenstrahls um die Düsenkante, gegebenenfalls auch bei einer – ein gewisses Maß nicht überschreitenden – Schrägstellung der Düsenachse sowie bei verschiedenen extrem ungünstigen Betriebszuständen, vermieden wird. Die konstruktive und fertigungstechnische Ausführung sollte demnach so sein, daß eindeutig Prallstrahlen mit Staubereichen erzeugt werden können.

Ferner ist bei der konstruktiven Ausführung zu beachten, daß für die aus den Düsen austretende Blasluft nach Passieren der Staubereiche und eines gewissen Strömungsweges entlang der Trocknungsoberfläche störungsfreie Abströmverhältnisse geschaffen werden. Zu enge Anordnungen der einzelnen Prallstrahlen zueinander – z. B. $j/B < 15$ bis 40 – sind weder notwendig noch ratsam, weil dann die Blasluft ohne besondere Maßnahmen nicht störungsfrei abströmen kann.

Werden Prallstrahldüsen auf beiden Seiten eines Blaskastens z. B. als Doppelschlitzdüsen angeordnet, so ist in der Regel wegen des engen Abstandes zwischen diesen Doppelschlitzdüsen eine störungsfreie Abströmung der Blasluft nicht zu erwarten. Ein ungehinderter Abström der Blasluft entlang der Trocknungsoberfläche ist aber nicht nur wegen einer besseren Stabilität der schwebend geführten Bahn, sondern auch wegen der besseren Abführung der nach der Trocknung mit Feuchtigkeit beladenen Abluft von Bedeutung.

Eindeutig störungsfreie Abströmverhältnisse sind zweifellos bei Düsenkörpern zu finden, bei denen die Schlitzdüse nur an einer Seite des Düsenkörpers angeordnet ist, so daß der aus dieser Schlitzdüse austretende Prallstrahl nach Überschreiten des Staubereiches und einer optimal bemessenen Weglänge entlang der Trocknungsoberfläche störungsfrei in den Abströmraum zwischen zwei benachbarten Düsenkörpern gelangen kann und erst dort auf den von der Nachbardüse kommenden Wandstrahl auftrifft. Der hierbei entstehende negative Staubereich ist von der Trocknungs-

fläche weg gerichtet und sorgt wegen der relativ größeren Platzverhältnisse zwischen den Düsenkörpern für ein sauberes Abströmen der Abluft sozusagen auf natürliche Art, auch wenn z. B. die direkte Absaugung zwischen den Düsenkörpern abgeschaltet ist.

Prallstrahl-Schwebetrockner, bei denen durch solche und weitere Konstruktionsausführungen die wesentlichen Merkmale des Prallstrahlprinzips unter Berücksichtigung der optimalen Abmessungen verwirklicht werden, sind im Prinzip zu den leistungsfähigsten Konvektionstrocknern zu zählen.

Auf welchem Wege ein optimiertes Prallstrahlprinzip bei einem neu entwickelten Prallstrahl-Schwebetrockner weitgehend verwirklicht werden konnte, soll am Beispiel eines solchen Trockners nach Abb. 13 etwas näher erläutert werden.

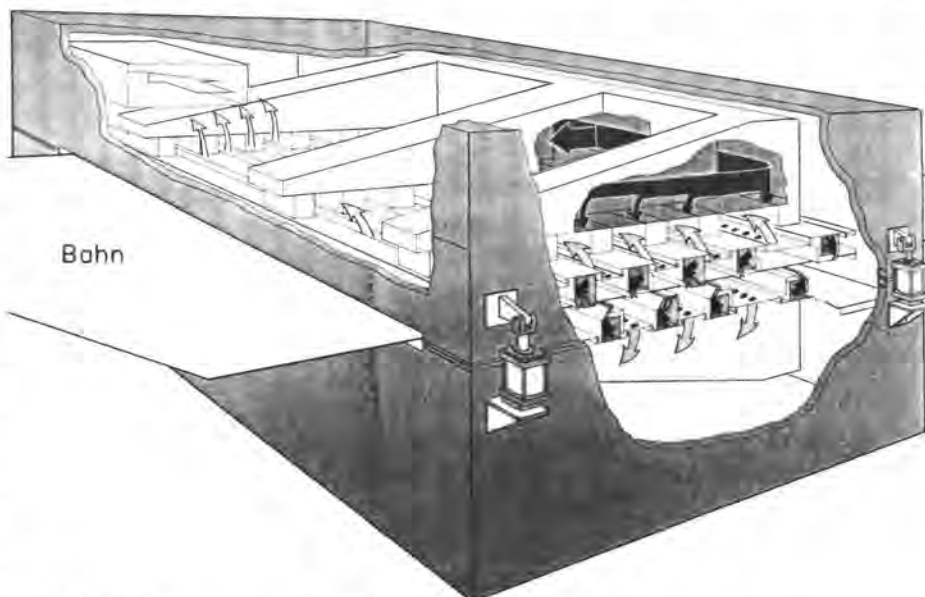


Abb. 13: Prallstrahl-Schwebetrockner (System Langbein & Engelbracht GmbH) schematisch

Die zu trocknende Materialbahn wird zwischen den auf beiden Seiten der Materialbahn angeordneten Prallstrahl-Schwebedüsen schwebend durchgeführt. Es handelt sich hierbei um zwei verschiedene Typen von neu entwickelten Prallstrahl-Schwebedüsen, de-

ren Konstruktionsprinzip aus Abb. 14 zu entnehmen ist.

Beiden Düsentypen ist gemeinsam, daß die inneren Längsränder der Schlitzdüsen scharfkantig ausgeführt sind und die Innenflächen der Schlitzdüsen in einer gewissen Winkelanordnung relativ zur ebenen Düsenwand stehen, so daß die Prallstrahlen etwas schräg auf die zu trocknende Materialbahn aufreffen. Eine in einem bestimmten Winkelbereich variiere Schrägstellung der Prallstrahlen erweist sich aus Stabilitätsgründen in bezug auf sehr gute Schwebeeigenschaften der Materialbahn als vorteilhaft. Die Schrägstellung der Prallstrahlachse gegenüber der Düsenwand w des Düsenkörpers wird dabei so gehalten, daß ein Winkel von ca. 60° nicht überschritten wird.

Durch die scharfkantige Ausführung der

Schlitzdüsenmündung und eine nur begrenzte Schrägstellung der Strahlachse ist mit Sicherheit gewährleistet, daß der Düsenstrahl mit einem eindeutigen Staubereich auf der Trocknungsoberfläche zwei entgegengesetzte Wandstrahlen erzeugt. Damit sind auch

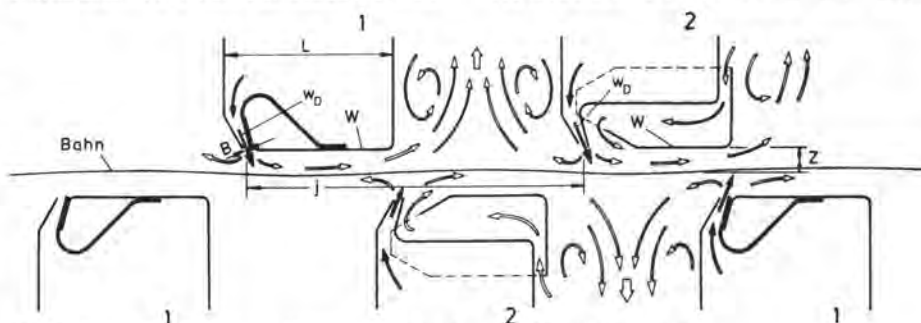


Abb. 14: Prallstrahl-Schwebedüsen (System Langbein & Engelbracht GmbH) schematisch

¹ Langbein & Engelbracht GmbH, Bochum

die Voraussetzungen für optimale Wärme- und Stoffübertragungsverhältnisse gegeben. Die hier gewählte maximale Schrägstellung der Prallstrahlen ist ohne wesentlichen Einfluß auf die mittlere Wärmeübergangszahl, die aufgrund von Untersuchungen an senkrechten Prallstrahlen bekannt ist.

Es sei noch vermerkt, daß auch bei nahezu senkrechter Prallstrahlachse dank des Fehlens zweiter Prall- oder ähnlicher Hilfsstrahlen an demselben Düsenkörper, die ein ungehindertes Abströmen der Blasluft verhindern würden, eine durchweg zufriedenstellende schwebende Führung der Materialbahn bei nicht kritischen Anwendungsfällen erzielt wird. Die Schrägstellung der Prallstrahlen kann also etwa zwischen den Winkeln von 90° bis 60° variieren und dadurch verschiedene Anwendungsfälle ermöglichen. So können z. B. die gleichen Prallstrahl-Schwebedüsen mit einer größeren Schrägstellung als Sperrdüsen am Ein- und Austritt des Trockners zur Verhinderung des Luftaustrittes aus dem Trockner eingesetzt werden. Dies hat den Vorteil, daß auch die Eintrittsdüsen und Austrittsdüsen in bezug auf die Trocknungseffektivität und zugleich als Luftsperrdüse sehr wirksam arbeiten.

Ferner kann der Neigungswinkel der Prallstrahlen an den Ein- und Austritten des Trockners auf die individuellen Bahneigenschaften (wie z. B. Bahngewicht, Bahnspannung usw.) bei der schwebenden Bahnführung sehr flexibel angepaßt werden.

Beide Düsentypen besitzen in bezug auf die Erzeugung von Prallstrahlen prinzipiell die gleichen Konstruktionsmerkmale. Sie unterscheiden sich lediglich in der Gestaltung der Düsenwand *w*, welche der Trocknungsfläche zugewandt ist und für die Blasluft als Prallstrahl nach Überschreiten des Staubereiches im weiteren Verlauf des Trocknungsweges eine Art Führungsfläche darstellt. Diese Düsenwand *w* schließt bei dem Düsentyp 1 unmittelbar an die scharfe Düsenkante in gleicher Höhe als eine glatte und ebene Wand an. Bei der Fertigung wird darauf geachtet, daß diese scharfe Düsenkante keinesfalls der Düsenwand *w* übersteht. Im Inneren des Düsenkörpers Typ 1 ist für strömungsgünstige Einlaufverhältnisse in den eigentlichen Düsenaustritt gesorgt. Mit diesen wesentlichen Konstruktionsmerkmalen kann der Düsentyp 1 als eine ausgesprochen wirksame Prallstrahldüse mit eindeutigen Prallstrahlverhältnissen und zugleich guten Schwebeeigenschaften angesehen werden.

Beim Düsentyp 2 beginnt die Düsenwand *w* erst nach einiger Entfernung von der Düsenkante, so daß an dieser Stelle eine Durchgangsöffnung vorhanden ist. Diese Öffnung, die quer zur Bahnaufrichtung je nach Anwendungsfall durchgehend oder auch nur teilweise durchgehend sein kann, stellt das Ende eines von dem eigentlichen Blasluftkanal völlig getrennten zusätzlichen Fluidführungs-kanals dar, dessen Anfang beziehungsweise dessen Eintrittseite, wie aus Abb. 14 ersichtlich, normalerweise an einer Seite des Düsenkörpers im Bereich der Abströmräume zwischen den benachbarten Düsenkörpern angebracht ist.

In gewöhnlichen Betriebsfällen wird durch diesen zusätzlichen Führungskanal aufgrund der Injektionswirkung des Prallstrahles ein geringfügiger Teil der Abluft aus den Abströmräumen zwischen den Düsenkörpern auf na-

türlichem Wege abgezweigt und durch die Öffnung dem Prallstrahl bzw. dem Wandstrahl von der Wandseite zugeführt, so daß eine mehr oder weniger selbsttätige Zirkulation eines geringen Anteils der Abluft um die Düsenwand *w* entsteht. Durch diese Abluftzirkulation wird eine sehr gute Stabilisierung bei schwebender Bahnführung erreicht, die sich besonders bei kritischen Anwendungsfällen, wie z. B. bei sehr geringen Bahngewichten und Spannungen, bewährt hat. Die Abmessungen dieses Fluidführungs-kanals sind so bemessen, daß nur ein geringer Anteil der Abluft um die Düsenwand herum zirkuliert. Auf diese Weise ist auch nur eine geringfügige Verminderung der Partialdruckdifferenz (Konzentrationsgefälle) in der Grenzschicht gegenüber den Strömungs- und Stoffübergangsverhältnissen z. B. in der Grenzschicht des Düsentyps 1 zu erwarten.

In Sonderfällen kommt diesem Fluidführungs-kanal besondere Bedeutung zu, nämlich dann, wenn eine Sonderbehandlung der Bahn während der Trocknung z. B. durch Zuführen von zusätzlichen anderen Fluiden (z. B. Wasserdampf, Inertgas) in die Grenzschicht beabsichtigt ist. In diesem Fall kann der Fluidführungs-kanal durch Anbringung seines Eintrittspaltes an einer anderen Stelle – beispielsweise quer zur Bahnaufrichtung gesehen an den seitlichen Abgrenzungen des Düsenkörpers – völlig von den Abströmräumen zwischen den Schwebedüsen getrennt werden, so daß durch die Injektionswirkung des Prallstrahles nicht ein Teil der Abluft, sondern ein anderes Fluid aus einem separaten Kanal zur Sonderbehandlung der Materialbahn angesaugt und der Grenzschicht des Wandstrahles zugeführt wird.

Auf diese Weise ist es z. B. bei der Offsetdrucktrocknung von mit sogenannten Heat-Set-Druckfarben bedruckten Bahnen denkbar, durch die Prallstrahlen in erster Linie das Lösemittel von der Druckfarbensicht zu verdunsten, d. h. also weitgehend nur die Druckfarbensicht an sich zu trocknen und zugleich durch Zufuhr von Wasserdampf über den Fluidführungs-kanal in den Strömungspalt zwischen der Düsenwand und der Bahnoberfläche den aus verschiedenen Gründen unerwünschten Feuchtigkeitsverlust der Materialbahn selbst während des Trocknungsprozesses durch extrem niedrige Wasserdampf-Partialdruckdifferenz (vgl. Abschnitt 4.1) in Grenzen zu halten.

Testversuche in dieser Richtung sind aus der Praxis bekannt, allerdings ohne nähere Angaben über die dabei erzielten Ergebnisse.

Den Erfolg oder Mißerfolg solcher Versuche oder Praxisausführungen beeinflussen natürlich auch die Konstruktionsmerkmale des eingesetzten Trockners entscheidend mit, je nachdem, ob der Trockner für solche Zwecke geeignet ist oder nicht. Eine andere Möglichkeit der Bahnbehandlung während des Trocknungsprozesses ist durch diese Art der Fluidführung zum Beispiel auch bei sehr breiten Materialbahnen gegeben, bei denen gegebenenfalls im gewissen Umfang Feuchteprofilkorrekturen in Querrichtung der Materialbahn vorgenommen werden müssen. Hierzu wird der Fluidführungs-kanal in Zonen unterteilt.

Ohne näher auf die weiteren Bahnbehandlungsmöglichkeiten und Einzelheiten einzugehen, sei vermerkt, daß bei diesem Prallstrahl-Schwebetrockner durch die Kombination der

beiden Düsentypen, die in der Regel alternierend auf beiden Seiten der Materialbahn angeordnet werden, ein sehr weites Feld von Aufgabenstellungen für eine energiebewußte Trocknung von schwebend geführten Materialbahnen flexibel und zufriedenstellend bearbeitet werden kann.

Zur Anordnung der Prallstrahl-Schwebedüsen ist noch zu sagen, daß beide Düsentypen zusammen oder getrennt sowie auch gruppenweise besonders im Ein- und Auslaufbereich eines längeren Trockners Platz finden können. Auch die gewisse Schrägstellung der Prallstrahlen kann sowohl in Richtung der laufenden Materialbahn als auch in entgegengesetzter Richtung sein, ohne wesentliche Veränderungen im Tragverhalten der Materialbahn zu bewirken. Läuft die Materialbahn in Richtung der schrägen Prallstrahlen, dann ist – insbesondere im Einlaufbereich des Trockners – im allgemeinen die Tragstabilität der Bahn etwas besser. Werden die Prallstrahl-Schwebedüsen so angeordnet, daß ihre schrägen Prallstrahlen entgegen der Laufrichtung der Bahn blasen, so wird bei sehr hohen Laufgeschwindigkeiten erfahrungsgemäß insbesondere im Düsenwandbereich im allgemeinen ein etwas höherer Wärmeübergang erreicht.

In Abb. 13 blasen die im Einlauf des Trockners auf beiden Seiten der Bahn angeordneten Prallstrahl-Schwebedüsen mit einer stärkeren Neigung in Bahnaufrichtung, während die in gleicher Richtung darauffolgenden weiteren Düsenkörper so angeordnet sind, daß sie entgegen der Bahnaufrichtung geneigte Prallstrahlen erzeugen. Dadurch werden die Vorteile der verschiedenen Blasrichtungen der Düsenanordnungen miteinander kombiniert. Außerdem sind auf diese Weise am Ein- und Auslauf des Trockners, wie bereits vorher in einem anderen Zusammenhang angedeutet, jeweils etwas stärker in das Innere des Trockners gerichtete Blasluftstrahlen als Sperrluft gegeben, die ein Ausströmen der Abluft aus dem Trockner verhindern. Auch das Einströmen in das Innere des Trockners ist praktisch auf ein Minimum beschränkt, da von den Ein- und Auslauf-Prallstrahl-Schwebedüsen ein jeweils nach außen gerichteter, wenn auch schwacher Wandstrahl wirksam ist, der abgesaugt wird. Zugleich sind natürlich auch die Druckverhältnisse im Trockner – insbesondere abluftseitig – gegenüber dem Umgebungsdruck so gehalten, daß der Trockner praktisch absolut dicht ist.

Damit sind eindeutige Voraussetzungen zur Verminderung der Abluftmenge gegeben, die gegebenenfalls im Zusammenhang mit einer thermischen Abluftreinigungsanlage energetisch gesehen wichtig sind.

Der Abstand zwischen den Ebenen, die durch die beiderseits der Bahn angeordneten Düsenmündungen bzw. Wände gegeben sind, beträgt je nach Anwendungsfall und Düsengeometrie – insbesondere Düsenbreite – ca. 10 bis 36 mm und ist innerhalb dieser Grenzen im Bedarfsfall auch veränderbar. Damit ist, wie bereits im Abschnitt 4 ausgeführt wurde, der Bahnabstand *Z* auch in extremen Betriebsfällen immer im Bereich des optimalen Wärmeüberganges.

Sehr stabile schwebende Bahnführungen werden mit hohen Bahngeschwindigkeiten von z. B. 1000 m/min auch bei verhältnismäßig kleinen Bahnabständen ohne die Gefahr des Berührens der Düsenmündungen bzw. Wände an der Bahnoberfläche erreicht. Dabei

ist besonders hervorzuheben, daß die Düsenaustrittsgeschwindigkeiten der auf beiden Seiten der Bahn angeordneten Prallstrahl-Schwebedüsen ohne eine Beeinträchtigung der Stabilität der schwebenden Materialbahn, falls erforderlich, stark voneinander abweichen können. Dadurch ist es z. B. möglich, auf der nicht bedruckten bzw. gestrichenen Bahnseite mit geringeren Düsenaustrittsgeschwindigkeiten zu operieren, ohne befürchten zu müssen, daß dadurch die Bahn im Schwebeverhalten etwa unruhig wird. Oft ist es nämlich nicht nötig, von der Rückseite aus intensiv zu trocknen, vielmehr dient die rückwärtige Trocknung bei einseitig bedruckten oder gestrichenen Bahnen in erster Linie einer gewissen Temperierung der Materialbahn von der Rückseite her zur Unterstützung der schichtseitigen Trocknung und zur weitgehenden Unterbindung der Bindemittelwanderung (Migration), die aus Qualitätsgründen verhindert werden muß.

Auf weitere Einzelheiten der Trocknerkonstruktion braucht hier nicht näher eingegangen zu werden. Konstruktionsmerkmale, z. B. wie gut etwa die Zu- und Abluftführungen im einzelnen aussehen; Zugänglichkeit des Trockners bei Stillstand; Anordnung von Brenner, Lufterhitzer, Ventilatoren usw. je nach Bahnbreite – bis ca. 8 m –, abhängig davon, ob die Aggregate eingebaut oder außenstehend angebracht werden; einwandfreie Isolation; kompakte Modulbauweise; Regelbarkeit der Lufttemperaturen und gegebenenfalls auch der Luftgeschwindigkeiten sowie der Abluftmengen usw. gehören heute durchaus zum Stand der Technik und sind bei vielen Trocknern vorzufinden.

Im folgenden Abschnitt soll nun die Möglichkeit der thermischen Abluftreinigung im Zusammenhang z. B. mit einem solchen, primärenergieseitig optimal ausgelegten Prallstrahl-Schwebetrockner kurz besprochen werden, da einem solchen je nach Einsatzgebiet gegebenenfalls entweder sofort oder aber zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen eine wirksame und

zugleich auch eine möglichst energiesparend funktionierende Abluftreinigungsanlage hinzugefügt werden muß. Ein optimales Zusammenwirken der beiden Anlagen ist höchstwahrscheinlich am besten dann gewährleistet, wenn beide Anlagen als Gesamtanlage zusammen konzipiert und nach Möglichkeit auch vom gleichen Hersteller angeboten werden.

6. Thermische Abluftreinigung in Kombination mit einem Prallstrahl-Schwebetrockner

Hat man sich zur Lösung eines anstehenden Emissionsproblems in Verbindung mit einem Konvektionstrockner zu einer thermischen Abluftreinigungsanlage entschlossen, so kann es normalerweise nicht allein um die Abluftreinigung ohne gleichzeitig eine sinnvoll geplante Energierückgewinnung gehen. Ein solches System muß, um wirtschaftlich zu bleiben, mindestens z. B. für Abluftvorwärmung, Frischluft- und Umluftbeheizung oder für kombinierte Beheizungsarten Möglichkeiten vorsehen, ebenso nach Bedarf weitere nachgeschaltete Energierückführungen in Form von zum Beispiel Dampf- oder Heißwassererzeugung sowie Thermalölbeheizung beinhalten.

Im Rahmen dieses Aufsatzes ist nicht beabsichtigt, auf diese verschiedenen Energierückgewinnungsmöglichkeiten einzugehen, sondern das Prinzip der Abluftreinigung als Beispiel für eine Offsetdrucktrocknung als Gesamtanlage mit einem Prallstrahl-Schwebetrockner und einer TNV-Anlage anhand des Verfahrensschemas nach Abb. 15 zu erklären.

Der Trockner kommt dabei, wie bereits anhand der konstruktiven Merkmale ausgeführt wurde, mit sehr geringen Abluftmengen aus. Durch die Verringerung des Abluftvolumens verringert sich auch der Gasverbrauch des Trockners. Die thermische Abluftreinigungsanlage (TNV) kann relativ kleiner gebaut werden. Außerdem sind dadurch die ohnehin bei

der Offsetdrucktrocknung im Gegensatz zur Tiefdrucktrocknung sehr spärlich anfallenden Lösemittelkonzentrationen, die je nach Farbdeckung normalerweise in der Größenordnung von etwa 0,5 bis 2 g/Nm³ liegen, zu erhöhen. Die Folge davon ist u. a. eine weitaus bessere Energiebilanz.

Die Frischluftzufuhr erfolgt über den Brenner und durch Ein- und Auslaßschlitze des Trockners, wobei der letztgenannte Anteil durch die Neigung der am Ein- und Auslaß befindlichen Prallstrahlen in gewissen Grenzen beeinflusst und im Bedarfsfall auch auf sehr geringe Mengen beschränkt werden kann. Die Frischluftmenge ist in gewissem Maß von der Trocknergröße, insbesondere von der Trocknerbreite abhängig, so daß hier keine allgemeinen Angaben gemacht werden sollen.

Für die Frischluftzufuhr zum Trockner über den Brenner ist normalerweise vorgewärmte Kühlwalzenabluft vorgesehen. Wie aus dem Verfahrensschema ersichtlich ist, wird diese Luft mit dem Verbrennungsluftventilator (VLV) über Kühlwalzen abgesaugt, einem Sekundärtaucher zugeführt und dort von der Abluft der TNV-Anlage – vor dem Austritt aus dem Kamin – vorgewärmt.

Der am Trockner installierte Brenner kann bei einer möglichen direkten oder indirekten Beheizung des Trockners mit der TNV-Anlage – im Verfahrensschema nicht näher gezeichnet – auch als Zusatzbrenner fungieren. Die Temperatur der durch den Umluftventilator (ULV) umgewälzten Trocknerluft wird normalerweise – bei Nichtbeheizung über die TNV-Anlage – mit diesem Brenner auf einem Wert gehalten, der wie aus Abschnitt 4 bekannt, zur Trocknung erforderlich ist. Der Abluftvolumenstrom, dessen Größe sich in erster Linie wegen der geringen Konzentrationen bei der Offsetdrucktrocknung nach der geringstmöglichen Frischluftmenge richtet, wird über den Abluftventilator (ALV) zuerst zum Primärtaucher der TNV-Anlage geführt.

In diesem „Abluftwärmetauscher“, der zur Einsparung von Primärenergie axial um den Reaktionsraum der TNV-Anlage angeordnet,

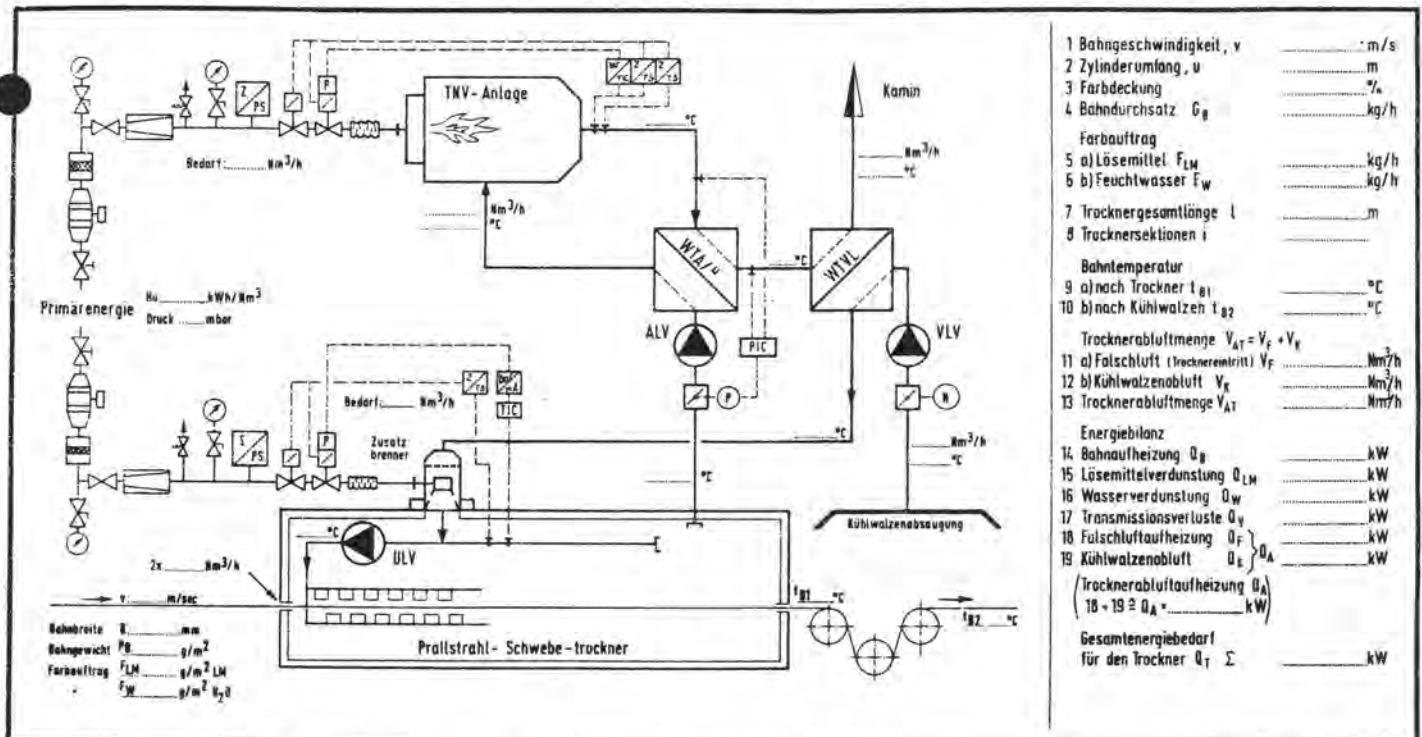


Abb. 15: Verfahrensschema einer thermischen Abluftreinigungsanlage für einen Prallstrahl-trockner zum Einsatz in der Offsetdrucktrocknung (System Langbein & Engelbracht)

d. h. also in die TNV-Anlage voll integriert ist, findet eine Aufheizung der Abluft mittels Verbrennungsluft statt. Als Verbrennungsluft in der TNV-Anlage wird wiederum Abluft verwendet.

Von der im Abluftwärmetauscher vorgewärmten Trocknerabluft werden 25% dem Brenner als Verbrennungsluft zugeführt, die übrigen 75% werden direkt in die Reaktionszone eingeblasen. Durch die in der Reaktionszone stattfindende Oxydation der organischen Fremdstoffe der Abluft während des Verbrennungsvorgangs erfolgt die Reinigung der Abluft. Die zur Oxydation erforderliche Zusatzenergie wird über den Brenner der TNV-Anlage zugeführt.

Die gereinigte Verbrennungsluft (Reingas) kühlt sich in Stufen zuerst im Abluftwärmetauscher, danach im Sekundärwärmetauscher wie z. B. beim Aufheizen der Kühlwalzenabluft und/oder anderen Wärmeträgern ab, die je nach den betrieblichen Erfordernissen vorgesehen werden können. Erst danach gelangt die gereinigte und abgekühlte Abluft zum Kamin.

In den Fällen, in denen eine Beheizung des Trockners aus der TNV-Anlage erfolgen soll, kann entweder direkt aus dem Reaktionsraum Reingas entnommen und über Tellerventile in die Umluftkreisläufe des Trockners eingespeist oder auch indirekt ein Teil der vorgewärmten Abluft vor Erreichen der Reaktionszone abgezweigt und dem Umluftkreis des Trockners zugeführt werden.

Die Entscheidung für die eine oder andere Lösung hängt u. a. auch von der erforderlichen Trocknungstemperatur ab und kann praktisch nur fallspezifisch getroffen werden. Auf jeden Fall kann aufgrund der seit mehreren Jahren in Betrieb befindlichen TNV-Anlagen mit verschiedenen Trocknersystemen gesagt werden, daß gute Erfahrungen mit der Trocknerbeheizung gesammelt wurden.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß zur Auslegung eines Primärenergie sparenden Trockners und gegebenenfalls der TNV-Anlage sowie zur Aufstellung ihrer Energiebilanzen einfache aber zuverlässige Auslegungsgrundlagen und Erfahrungen vorliegen müssen, damit sowohl für den Betreiber als auch für den Anlagenhersteller langfristig zufriedenstellende Betriebsverhältnisse herrschen. Es wäre daher wünschenswert, wenn sich Anlagenbauer und Betreiber einerseits wie auch die wissenschaftlichen Hochschulinstitute an-

dererseits nach Möglichkeit in mehr Zusammenarbeit als bisher mit diesen Themen beschäftigen könnten.

7. Zusammenfassung

Unter dem Aspekt der Energieeinsparung bei Trocknungsprozessen wurde über die verschiedenen Einsatzgebiete der Prallstrahl-trockner, einschließlich der Schwebetrockner, sowie deren Leistungsfähigkeit im Vergleich zu anderen Trocknern, insbesondere der Überströmtrockner in der Gruppe der Konvektionstrockner berichtet. Da bei der Trocknung von großflächigen Bahnen teilweise auch schwebende Bahnführungen im Trockner erwünscht sind bzw. erforderlich werden, haben sich verschiedene Konvektionstrockner als sogenannte Schwebetrockner herauskristallisiert, die bisher nicht eindeutig einer Klassifikation zugänglich waren. Daher wurde versucht, die Schwebetrockner nach der Art der Strömungsführung in gewisse Gruppen einzuteilen. Diese Einteilung ist nach Art der Anströmung der Bahnoberfläche durchgeführt worden. Es konnte auf diese Weise zwischen Prallstrahl-Schwebetrocknern und den Überström-Schwebetrocknern unterschieden werden.

Als gemeinsames Merkmal für Prallstrahl-Schwebetrockner wurde definiert, daß Düsenstrahlen ganz oder teilweise auf einer schwebend geführten Bahn Staubbereiche bilden, unabhängig davon, ob sie senkrecht oder schräg auf die Bahn aufprallen. Für die Gruppe der Überström-Schwebetrockner wurde als charakteristisches Hauptmerkmal eine im wesentlichen parallele Anströmung der Trocknungsoberfläche ohne Staubbereiche, das heißt als Spalt- bzw. Kanalströmung definiert.

Durch diese Einteilung wurde auch möglich, vergleichende Betrachtungen über den Wärme- und Stoffübergang und damit auch über die Trocknungsgeschwindigkeit, d. h. also über die Trocknungsleistung der verschiedenen Trocknergruppen anzustellen. Die Grundlagen der Wärmeübertragung bei Prallstrahl-anordnungen wurden anhand einfacher Bestimmungsgleichungen erläutert.

Da bei Überström-Trocknern entsprechende Bestimmungsgleichungen fehlen, wurden aufgrund der vorgenommenen Einteilung als Berechnungsgrundlage die bekannten Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung für durchströmte Kanäle und umströmte Körper

zugrunde gelegt. Dabei ist der Bereich zwischen den benachbarten Überströmdüsen als Wandstrahl differenziert betrachtet. Damit wurden Bestimmungsgleichungen für die mittlere Wärmeübergangszahl der Überström-Düsenanordnungen für die gesamte Trocknungsstrecke erfaßt.

Da weder die Wärme- noch die Stoffübergangszahlen allein über eine bestimmte zu erbringende Trocknungsleistung Auskunft geben, wurden die für eine Konvektionstrocknung maßgeblichen Haupteinflußgrößen auf die Trocknungsleistung, d. h. die Trocknungslufttemperatur und die Düsenaustrittsgeschwindigkeit getrennt erfaßt und in Form von Kurvenscharen für verschiedene Trocknungsleistungskurven – als Beispiel Verdunstung von toluolhaltigen Farbschichten – dargestellt. Damit ist eindeutig möglich gemacht, für eine bestimmte erforderliche Trocknungsleistung mit einer bestimmten Düsengeometrie den Einfluß der Lufttemperatur und der Geschwindigkeit in wechselseitiger Beziehung zueinander getrennt aufzuzeigen.

Die unter diesen Bedingungen durchgeführten Leistungsvergleiche zwischen den Prallstrahl-Schwebetrocknern und den Überström-Schwebetrocknern – z. B. sog. Coandastrahl-Ausführungen – fielen unter den in der Praxis vorkommenden Temperatur- und Geschwindigkeitsbereichen eindeutig zugunsten der Prallstrahl-Schwebetrockner aus. Mit Hilfe solcher Kurvenscharen war es auch möglich, Leistungsvergleiche unter verschiedenen Prallstrahl-Anordnungen anzustellen und dabei optimale Anordnungen aufzuzeigen. Die Ergebnisse sind dazu geeignet, für die gewählte Lösemittelverdunstung einen optimalen Prallstrahl-trockner zu finden und den Gesamtenergieaufwand des Trockners auf ein Minimum zu reduzieren.

Im Anschluß daran ist aufgezeigt worden, wie ein optimiertes Prallstrahlsystem mit Hilfe von zwei verschiedenen Prallstrahl-Schwebetrocknertypen als ein neuer Prallstrahl-Schwebetrockner mit sehr guten Trocknungsleistungen und stabilen Bahnführungen bei geringen Abluftmengen verwirklicht wurde. Als ein Beispiel für die Kombination eines solchen Trockners mit einer thermischen Abluftreinigungsanlage ist auch der Bereich der Offsetdruck-trocknung einbezogen. ◇

Literaturverzeichnis:

[13] Dosdoğru, G.: Prallstrahl-trockner im Vergleich untereinander und mit anderen Trocknern. dpw Deutsche Papierwirtschaft 1982/3 S. 200 ff., 1982/4 S. 174 ff. und 1983/1 S. 78 ff.